



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PARAMETRISEN SUUNNITTELUN  
KEHITTÄMINEN TERÄSBETONISTEN  
RUNKORAKENTEIDEN  
TOTEUTUSSUUNNITTELUSSA**

Marko Räihä

KONETEKNIikka

Diplomityö

Joulukuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Parametrisen suunnittelun kehittäminen teräsbetonisten runkorakenteiden toteutussuunnittelussa

Marko Räihä

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö, Joulukuu 2020, 72 s. + 2 liitettä (22 s.)

Työn ohjaaja yliopistolla: Antti Niemi

Työn tavoitteena oli kehittää laskentaohjelma, josta on hyötyä rakennesuunnittelun toteutusvaiheessa rakennuksien runkojen suunnittelussa. Laskentaohjelma kehitettiin tehtäväketjuja lähtöarvoista muodostavista algoritmeista, jotka perustuvat parametriseen suunnitteluun. Algoritmeista muodostettiin toisistaan riippuvia ohjelman sisäisiä laskureita, mitkä määrittävät rakenteille muun muassa ominaiskuormitukset sekä dimensiotiedot.

Diplomityössä selvitetään, voiko algoritmien avulla luotua parametrista mallintamista sekä suunnittelua hyödyntää rakennesuunnittelussa toteutusvaiheessa. Tutkimuksen tarkoituksena oli myös löytää laskentakeino, jolla laattojen tasokuormista saadaan muodostettua luotettavasti automatiikalla kuorma- sekä momenttikuvaajat kantaville palkeille. Työssä arvioidaan, kuinka paljon parametrista suunnittelua hyödyntävä algoritmi nopeuttaa suunnittelua ja parantaa tulosten tarkkuutta verrattuna yleisesti toteutussuunnittelussa käytettyihin laskentamenetelmiin.

Parametrista rakennesuunnittelua ei hyvin yleisesti nykypäivänä Suomessa käytetä, joten sen potentiaalia ei ole vielä täysin hyödynnetty. Diplomityön tarkoituksena on kartoittaa, kuinka monimutkaista rakennetekniikkaa parametrisilla suunnittelumenetelmillä voidaan hallita ja kuinka kilpailukykyisiä ne ovat tavanomaisten suunnittelumenetelmien rinnalla. Algoritmisella suunnittelulla on kyky muotoutua lukemattomiin erilaisiin käyttäjän määräämiin tarpeisiin, mistä syystä siitä voi muodostua suunnittelijoille erityisen poikkeuksellisen työkalu.

# ABSTRACT

Development of parametric design in the design of reinforced concrete frame structures

Marko Rähä

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis, December 2020, 72 pp. + 2 Appendixes (22 pp.)

Supervisor at the university: Antti Niemi

The main goal of this thesis was to generate a program which is useful in the design of load bearing structures for the house construction. The program was generated based on algorithmic parametric structural design. The programmed data consist of numeral algorithmic counters which prescribe structural loads and dimensions.

The thesis finds out the answer to following question: is the parametrical design reliable and reasonable expedient to analyze and design load bearing structures? Furthermore, the thesis introduces calculation methods for generating line load and bending moment graphs for load bearing beams from defined surface loads. At the end of this study was compared, how parametrical structural designing precipitates designing processes comparing with the most conventional methods which were commonly used in industry. It was able to successfully demonstrate how well comparable parametrical programs outcomes were in comparison to the other commonly used methods. The full potential of parametric engineering has not been exhausted in Finland. More research work is needed to develop algorithmic design tools further.

# ALKUSANAT

Tutkimustyön aikana tein parametriseen suunnitteluun perustuvan laskentaohjelman, mikä voisi olla hyödyllinen työkalu toteutussuunnittelussa rakenneosien suunnittelussa sekä detaljoinnissa. Ohjelman avulla suunnittelu olisi nopeaa sekä vaivatonta ja osa automaattista prosessia. Aiempaa kokemusta käytetyistä ohjelmistoista minulla ei ollut ja parametrisesta suunnittelusta minulle oli kokemusta karttunut hyvin vähän. Tämä työ antoi minun tarkastella rakennesuunnitteluun mahdollistavia menetelmiä laajakatseisemmin ja ymmärtämään siihen kelpuutettuja työkaluja paremmin.

Kiitos Sweco Rakennetekniikka Oy:n Oulun yksikön johdolle sekä erityiskiitos Sweco Rakennetekniikka Oy:n Oulun yksikön DI Paavo Vähäselle, DI Eemeli Tikkaselle sekä DI Tuomas Jaakkolalle työn ohjauksesta. Lisäksi kiitän kaikkia yrityksessä sekä yrityksen ulkopuolella olevia, jotka ovat työhöni osallistuneet ja auttaneet. Diplomityö on rahoitettu Sweco Rakennetekniikan toimesta ja se suoritettiin Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan konetekniikan tutkinto-ohjelmaan.

Oulu, 11.12.2020



Marko Räihä



# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	7
2 Teräsbetonisten runkorakenteiden suunnittelu.....	8
2.1 Raakamallinnus ja toteutussuunnittelun suunnitelmien vaiheistus .....	8
2.2 Runkorakenteiden suunnittelu tavanomaisella menetelmällä .....	10
3 Runkojärjestelmä.....	13
3.1 Yleiset runkojärjestelmämallit teräsbetonirakenteisissa rakennuksissa.....	13
3.1.1 Pilari-palkki-laattarunkojärjestelmä .....	14
3.2 Runkojärjestelmien rakenneosat .....	15
4 Parametrinen suunnittelu.....	16
4.1 Rhinoceros3D.....	17
4.1.1 Grasshopper-lisäosa .....	17
4.1.2 Grasshopperin lisäosat .....	18
4.2 Parametrinen mallintaminen Rhino-Grasshopperissa .....	20
5 Toteutussuunnitteluun luotu parametrinen laskentaohjelma.....	22
5.1 Geometriatietojen määrittäminen parametriseen laskentaohjelmaan.....	23
5.1.1 Geometrian piirtämisen säännöt AutoCADissa.....	23
5.2 Parametrisen laskentaohjelman käyttöjärjestelmä .....	25
5.3 Suureiden laskenta parametrisessa laskentaohjelmassa .....	27
5.3.1 Kuormitusyhdistelmien määrittäminen .....	28
5.3.2 Yhteen suuntaan kantavien laattojen tasokuormien jakautuminen.....	29
5.3.3 Ei-kantavien väliseinien ja palkkien omapainokuormien jakautuminen .....	33
5.3.4 Reaktiovoimien määrittäminen sekä piilokonsolien iterointi .....	34
5.3.5 Normaalivoimien sekä pilarikokojen määrittäminen.....	38
5.3.6 Palkkiprofiilien määrittäminen .....	39
5.3.7 Momenttikuvaajan muodostaminen.....	42
5.3.8 Kuormakuvaajan muodostaminen .....	47
6 Tuloksien tarkastelu .....	50
6.1 Tuloksien vertailuun luotu kerrospohja .....	51
6.2 Tuloksien vertailu eri laskentamenetelmillä .....	51
6.2.1 Momenttikuvaajien tuloksien vertailu .....	52
6.2.2 Kuormakuvaajien tuloksien vertailu.....	55
6.2.3 Reaktiovoimien tuloksien vertailu .....	56
6.3 Piilokonsoli- ja palkkidimensioiteroinnin tulokset .....	57

6.4 FEMillä lasketun palkki-laattarakennemallin tuloksien vertailu .....	60
6.5 Muut algoritmisten laskentamenetelmäkokeilujen tulokset.....	62
6.6 Laskentatuloksien Tekla-mallinnus Tekla live linkin avulla .....	63
7 Johtopäätökset.....	65
8 Yhteenveto .....	70

## LÄHDELUETTELO

### LIITTEET:

Liite 1. Palkki-laattatapauksien tuloksien vertailutaulukot

Liite 2. Palkki-laattatapauksien käsinlaskenta

# 1 JOHDANTO

Diplomityön tavoitteena oli kehittää parametrinen suunnittelun työkaluja niin, että niillä muodostettavat luonnostason runkosuunnitelmat saadaan jalostettua detaljointi- ja toteutustasoille. Työssä jatkokehitetään Paavo Vähäsen diplomityössä kehitettyä Rhinon Grasshopper-suunnittelutyökalua, jossa rakennuspohjasta piirretyn 2D-kuvapohjan avulla muodostetaan 3D-laskentamalli yhdestä lähtötietoaineistosta (Vähänen 2019).

Vähäsen diplomityön jatkokehityskohtana oli, että lujuuslaskentamallit kehitettäisiin eteenpäin niin, että pilari- ja palkkirakenteiden mitoitusvoimasuureiden luotettava laskenta saataisiin automatisoitua. Sauvarakenteista ratkaistavien voimasuureiden tulee olla tarkkoja ja helposti tarkistettavissa. Tarkasti laskettujen voimasuureiden perusteella, rakenneosien poikkileikkausvalinnat voidaan suorittaa automaattisesti esivalintakäyriin ja erillisiin mitoituslaskentapohjiin perustuen.

Vähäsen Grasshopperin laskentamalli on muodostettu niin, että tasorakenteet kuvataan laskentamallissa kuorirakenteisena levynä. Tämä on tavallisin tapa muodostaa FEM-laskentamallit, kun laskentamallin tarkoituksena on tarkastella rungon kokonaisjäykkyyttä, stabiiliteettia ja käyttökelpoisuuskriteereitä (Vähänen 2019). Tällaisesta mallista ei tavanomaisesti mitoiteta pilari- ja palkkirakenteita, koska niiden osalta laskentamallien laskentatulokset ovat virheellisiä. Kun tasot kuvataan kuorirakenteina, palkkien leikkausvoimakuvajaajat vääristyvät, koska kuorirakenteina kuvatut laatastot kytkeytyvät suoraan tarpeettomasti pystyrakenteisiin kiinni. Sauva- ja kuorirakenteiden välisten vapausteiden kytkösten realistinen kuvaaminen FEM-laskentamalleissa on hankalaa.

Diplomityön tavoitteena oli muodostaa Grasshopperin avulla saman 2D-kuvapohjan perusteella sauvarakenteista oma irrallinen ”rautalankalaskentamalli”, jossa välipohjia ei ole mallinnettu kuorirakenteilla, vaan välipohjien kuormitukset on kuvattu palkkien päälle asetetuilla viiva- ja pistekuormilla. Tällä tavalla sauvarakenteiden kuormat saadaan määrättyä luotettavasti. Työn tavoitteena oli saada sauvarakenteiset laskentamallit muodostettua niin, että palkkien viivakuormitusten sekä momenttijakaumien määritykset ovat automaattista 2D-kuvan tasojen perusteella.

## **2 TERÄSBETONISTEN RUNKORAKENTEIDEN SUUNNITTELU**

Rakennushankkeen tavanomainen läpivienti sisältää kuuden kohdan vaiheistuksen, mitkä ovat tarveselvitys, hankesuunnittelu, luonnossuunnittelu, toteutussuunnittelu, rakentaminen ja rakennuksen käyttöönotto. Tavanomainen rakennesuunnittelu koostuu kolmesta edellä luetelluista vaiheesta: hankesuunnittelusta, luonnossuunnittelusta ja toteutussuunnittelusta.

Hankesuunnittelussa asetetaan tavoitteet suunnitelmien kustannuksista, aikataulutuksista, laajuudesta, laadusta sekä toimivuudesta. Tavallisena rakennesuunnittelijan päätehtävänä on lähtötietojen kerääminen, joista muodostetut arviot pyrkivät täyttämään edellä luetellut tavoitteet. Vaiheen lopuksi luodaan hankesuunnitelma, minkä lisäkirjeenä esitetään investointipäätös (Kallasjoki 2016).

Luonnossuunnitteluvaiheessa suunnitelmia kehitetään toimiviksi sekä kustannustehokkaiksi. Luonnossuunnittelussa valitaan rakennukselle runkojärjestelmä. Lisäksi määrätään perustamistapa, osastoivat tilat ja kantavat rakenteet. Luonnossuunnittelussa tehdyillä päätöksillä on merkittävä painoarvo, kuinka kustannustehokkaaksi ja rakennusteknillisesti toimivaksi hanke tulee muodostumaan (Kallasjoki 2016).

Toteutussuunnitteluvaiheessa luonnossuunnitelmia kehitetään toteutuskelpoisiksi mitoitetuksi suunnitelmiksi. Lisäksi vaiheessa laaditaan tuotemäärittelyt rakenneosille. Suunnitelmat ovat lopulliseen muotoon hiottuja ja rakenneosista on tehty tarkentavia kuvia, laskelmia, raportointeja sekä detaloitteja. Suunnitelmat on tehty suurella tarkkuudella, sillä niiden on myös tarkoitus palvella työmaan hankintoja, vaiheistuksia, laatutasoa sekä projektiaikataulun hallintaa (Kallasjoki 2016).

### **2.1 Raakamallinnus ja toteutussuunnittelun suunnitelmien vaiheistus**

Tavanomaisessa toteutussuunnittelussa rakenteiden suunnittelu voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, mitkä ovat rakennejärjestelmien-, rakenneosien- ja rakenneliitosten suunnittelut. Rakennejärjestelmää kutsutaan myös nimellä runkojärjestelmä. Runkojärjestelmiä käsitellään tässä diplomityössä myöhemmin.

Nykyaikainen rakennesuunnittelu perustuu tavanomaisesti tietomallipohjaiseen suunnitteluun. Rakennuksesta luodaan aluksi varhainen kolmiulotteinen raakamalli, joka tavallisesti on lopullisten rakennesuunnitelmien tavoitteellinen ja todellisuuteen pyrkivä esitys. Raakamallin laatu voi vaihdella suuresti riippuen projektivaatimuksista. Tarjousvaiheessa se voi olla hyvin pelkistetty esitys. Rakenteiden sijainnit ja rakenneosien dimensiot eivät välttämättä ole tarkkoja. Keskeisimmät lähtökohdat, kuten esimerkiksi rakennejärjestelmät, kantavat rakenteet ja perustustavat, on mallissa pyritty esittämään mahdollisimman tarkasti. Jos raakamalli luodaan pelkästään kustannuslaskentaa varten, voi mallista muodostua vielä pelkistetympi, kuin mitä se voisi olla tarjousvaiheessa. Tavoitteena olisi kuitenkin aina luoda raakamalli, mikä perustuisi mahdollisimman tarkkaan vaadittuun mallinnustarkkuuteen. Usein alkuvaiheessa tätä tavoitetta rajoittavat kiireelliset projektitehtävät ja tiukat aikatauluvaatimukset.

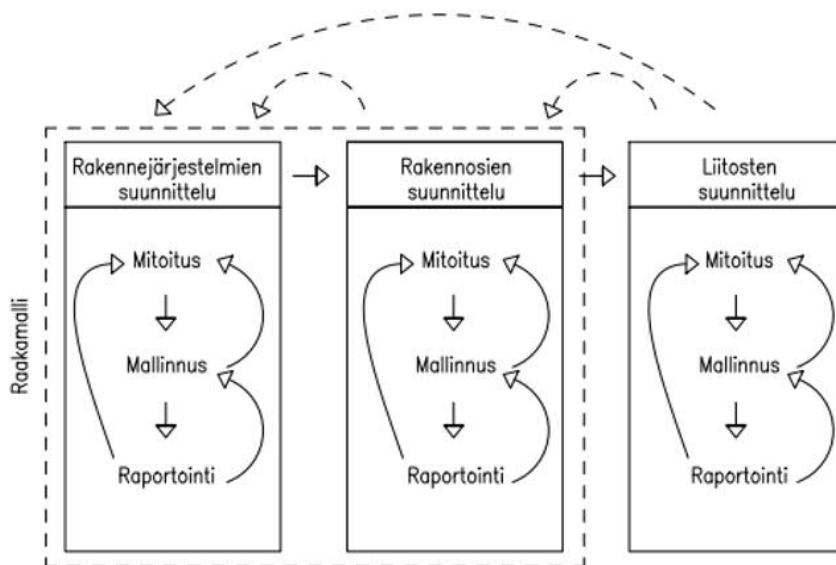
Raakamalli täytyy aina tehdä mallintamalla toteutettavissa projekteissa. Tavallisesti siinä on mahdollisimman todenmukaisesti määritelty muun muassa runko-osien dimensiot, seinien paksuudet ja laatat. Tietoja määritellään sekä tarkistetaan yleensä samaan aikaan raakamallia tehdessä. Detaljointia, rakenneosien liitoksia ja raudoituksia ei vielä malliin määrätä.

Onnistuneen tarjousvaiheen jälkeen, raakamallia aletaan kehittämään toteutussuunnitelmiksi. Epätarkkojen lähtötietojen sekä muiden mahdollisten tapauskohtaisten ongelmatekijöiden seurauksena, voidaan raakamalli tarjousvaiheen jälkeen jopa unohtaa. Rakennuksesta tehdään tällöin uusi raakamalli, mikä koostuu tarjousvaiheen suunnittelua tarkemmista lähtötiedoista. Raakamallintaminen on usein nopeaa, ja siksi on yleensä helpompaa tehdä rakennuksesta kokonaan uusi malli, kuin alettaisiin muokkaamaan vanhaa epätasalaatuista raakamallia.

Rakenteiden toteutussuunnittelu on tavanomaisesti monivaiheinen ja iteratiivinen prosessi. Suunnitelmat tarkentuvat yleensä raakamallinnuksesta projektisuunnitelman mukaisesti sitä mukaa, miten projektisuunnitelmaan määrätyllä edistymisen aikajanalla edetään. Rakenteet suunnitellaan yleensä mallinnustyön aikana. Samalla jatkuvasti tarkkaillaan oikealaista tasapainoa ja toimivuutta rakennejärjestelmä-, rakenneosa- ja rakenneosaliitossuunnitelmien välillä. Tämä voi vaatia useita laskennallisia sekä suunnitelmien tarkastuksen iterointikiertoja ja virheet, tai esimerkiksi rakennuksen arkkitehtoniset muutosvaikutukset, voivat pakottaa suunnittelijan palamaan taaksepäin jo

aiemmin tehtyihin päätelmiin ja laskelmiin. Pahimmassa tapauksessa aikaisemmat raportoidut asiakirjat voivat muuttua merkitsemättömiksi, jolloin voidaan joutua tekemään suunnittelun työvaiheet useaan kertaan. Myös mallinnettu geometria liitosdetaljeineen voidaan todeta hyödyttömäksi, mikä voi asettaa projektille merkittäviä ajallisia haasteita. Kuvan 1 rakennekaaviossa esitetään vaiheet, kun rakenteet suunnitellaan tavanomaisilla menetelmillä. Siinä myös kuvataan, miten rakenteiden suunnitelmat voivat riippua toisistaan ja millä tavalla niillä voi olla vaikutuksia varhaisempiin suunnitelmiin.

Tavanomainen suunnittelu:



Kuva 1. Rakenteiden suunnittelu tavanomaisilla menetelmillä. Rakennesuunnittelu jakaantuu tavallisesti kolmeen päävaiheeseen, jotka myös tavallisesti sisältävät kolmen kohdan iteroinnin. Raakamalli koostuu tavanomaisessa rakennesuunnittelussa tyypillisesti rakennejärjestelmien ja rakennosien suunnitteluista.

## 2.2 Runkorakenteiden suunnittelu tavanomaisella menetelmällä

Rakennuksien runkorakenteiden suunnittelu alkaa yleensä luonnossuunnittelussa kuormien määrittämisellä. Kuormat määrätään jokaiselle kerrokselle tapauskohtaisesti tilankäytön mukaan. Laattojen tiedot ja dimensiot voi olla jo alkuvaiheessa kokonaan tai osittain määrätty. Rakennuksen kuormat ovat lähtökohtaisesti kerrokselle määrättyjä tasokuormia. Myös rakennuksen ulkopintoihin huomioidaan tuulikuormat, mitkä vaikuttavat rakennuksen stabiiliteetin, perustuksien ja pilarien mitoitukseen.

Rakennukselle tulee määrätä runkojärjestelmä, minkä stabiilisuutta analysoidaan tarvittaessa FEM-ohjelmalla luonnossuunnitteluvaiheessa. Yleensä stabiilisuus

arvioidaan yksin karakteristisilla käsinlaskentatavoilla. Erilaisia rakenteellisia vaihtoehtoja verrataan ja kantavien rakenteiden asetteluita sekä määriä pohditaan. Tavallisesti varsinaiset rakenneosien suunnittelut aloitetaan, kun rakennuksen stabiilisuus ja runkojärjestelmä on todettu toimiviksi. Teräsbetonirakenneosille määrätään luonnossuunnittelussa mahdollisimman tarkasti kuormituksen vaikutuksen mukaiset dimensiot, mitkä perustuvat esimerkiksi rakenneosakohtaisiin esivalintakäyriin. Rakenneosien dimensiotiedot tarkentuvat yleensä toteutussuunnitteluvaiheessa. Toteutussuunnittelussa teräsbetonirakenteille lasketaan myös raudoitteet ja punokset. On hyvin tavallista, että toteutussuunnittelun aikana rakennukseen voi syntyä rakenteellisia muutoksia, mitkä monesti aiheuttavat muutostöiden lisäkustannuksia.

Rakenneosien suunnittelujärjestykselle ei ole varsinaisesti asetettu virallisia ohjesääntöjä. Rakenteita yleensä suunnitellaan siinä järjestyksessä, miten ne on tottumuksellisista syistä todettu käytännölliseksi. Suunnittelujärjestyksestä riippumatta pääperiaate on, että luonnossuunnitelmat olisivat jo mahdollisimman pitkälle mietitty ennen kuin siirrytään toteutussuunnitteluvaiheeseen.

Tavallisesti, tavanomaisia suunnittelumenetelmiä hyödyntäessä, jokainen rakenneosa mitoitetaan erikseen. Ne mitoitetaan tavallisesti FEMillä, käsinlaskennalla tai joko käyttämällä muita yksittäisten rakenneosien suunnitteluun laadittuja laskentaohjelmia. Rakenneosille kantautuvat kuormat määritetään tasoilta tavallisesti käsin. Maksimikuormitukset ja maksimimomentit lasketaan yksittäin kullekin palkille käsin tai yleensä käyttämällä FEMiä tai muita rakenneosien suunnitteluun luotuja laskentaohjelmia.

Yleensä tavanomaisessa rakennesuunnittelussa jaksottaisille samankaltaisille sekä samankaltaisia kuormituksia omaaville rakenneosille määrätään toistuvia profiileja. Profiilia toistetaan rakenneosille ja myös mahdollisesti niille rakenteille, joissa kuormitus saattaisi hieman poiketa alkuperäisestä profiililaskennan tuloksesta. Käytännössä sillä ei ole suurta merkitystä, koska usein vastaavat rakenneosat todetaan toimiviksi kyseisellä profiilikoollla. Tähän menettelyyn perustuu useiden suurien rakennuksien toistuvien rakenneosien dimensioiden määrittäminen. Menetelmällä voidaan esimerkiksi yleistettyä perustuskokoa monistaa täysin tai lähes kokonaan rakennuksen alalle. Mahdollista kuitenkin on, että osa tällä tavalla määrättyjä perustuksia voidaan vahingossa ylimitoittaa tai pahimmassa tapauksessa alimitoittaa. Vaikka rakenneosien suunnitelmia yleistetään,

ei se tarkoita sitä, etteikö jokaista rakenneosasuunnitelmaa pitäisi tarkistaa. Suunnitelmien tarkastus on yksi tärkeimmistä ja suurimmista aikaa vievistä suunnittelutehtävistä. Tarkistusprosessi tulisi toteuttaa yksiselitteisesti jokaisesta rakenneosasta raportoidussa ja säilytettävässä asiakirjamuodossa.

Projektien kiireelliset aikataulut ja taloudelliset syyt ovat suurimmat tekijät rakenneprofiilien yleistämiseen. Esimerkiksi suurissa teollisuusrakennuksissa voi sijaita useita satoja samankaltaisia rakenneosia, kuten muun muassa palkkeja. Jos jokainen rakenneosa joudutaan erikseen analysoimaan ja laskemaan, saattaisi siihen kulua merkittävä määrä resursseja ja aikaa. Se ei välttämättä olisi projektitaloudellisesti kannattavaa. Kuitenkin yksittäiset rakennusteknillisesti haastavat sekä kuormituksellisesti merkittävät rakenneosat, joita ei voida tyypillistää, täytyy laskea ja analysoida erikseen.

Rakenneosien liitokset suunnitellaan tavanomaisilla menetelmillä yleensä dimensioiden määrityksien jälkeen erikseen. Rakenneosien liitoskohtiin määrätään kuorma- sekä momenttituloksien lähtötiedot, mitkä saadaan usein käsinlaskennasta tai esimerkiksi FEMillä luodusta mallista. Tuloksien arvoja verrataan muun muassa eri valmistajien liitosesivalintataulukoihin tai niitä käytetään hyväksi muissa eri liitosratkaisusuunnitelmien laskelmissa. Rakenneosille määritetyt liitostiedot kirjataan ylös tai niiden paikat merkitään esimerkiksi kerroksien tasokuvakaavioihin, joista ne tavallisesti mallinnetaan yksitellen rakennuksen tietomalliin. Rakenneosien suunnittelu on aikaa vievä prosessi. Suurten tietomalliprojektien ennalta määrättyjen profiili- ja liitostietojen mallintaminen voi kuluttaa suuresti resursseja ja aikaa. Siksi onkin hyvin perusteltua kehittää menetelmiä, joilla voidaan eri suunnitteluvaiheiden välivaiheita yhdistää, yksinkertaistaa ja automatisoida.



### 3 RUNKOJÄRJESTELMÄ

Rakennuksen runkojärjestelmän valinta on yksi keskeisin tekijä rakenteiden suunnittelussa. Rakennuksen runkojärjestelmä määrää, miten kuormia hallitaan rakenneosien välillä. Rakennukseen voidaan valita yksi tai useampi runkojärjestelmä, joiden määrityksissä korostuu arkkitehdin sekä rakennesuunnittelijan välinen yhteistyö. Yhteistyö ja yhteisymmärrys täytyy olla saumatonta, sillä runkojärjestelmän valinnassa täytyy huomioida molempien osapuolten vaatimukset. Ne ovat esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoitus, rakennuksen ulkomuoto, korkeus, rakennuksen kuormat, rakennuksen pohjaratkaisut, talotekniset ominaisuudet, ulokerakenteet sekä rakennuspaikka (Vähänen 2019).

#### 3.1 Yleiset runkojärjestelmämallit teräsbetonirakenteisissa rakennuksissa

Teräsbetonirakenteille on olemassa useita erilaisia runkojärjestelmämallia, joita ovat muun muassa ydinjärjestelmä-, pilari-laatta-, kantavat seinä-laatta- sekä pilari-palkki-laattarunkojärjestelmät. Ydinjärjestelmää käytetään yleisimmin korkeissa rakennuksissa. Se voi olla osa yhtä runkojärjestelmäkokonaisuutta. Ydinjärjestelmässä rakennukseen on sijoitettu ylös asti, lähelle vesikattorakenteita ylettyviä, kotelomaisia rakenteita. Kotelomaisuus ei ole välttämättömyys ja rakenteita voi esiintyä rakennuksessa enemmän kuin yksi. Nämä rakenteet ovat yleensä huolto-, IV- tai hissikuiluja, mitkä geometrioillaan ja sijainneillaan jäykistävät koko rakennuksen.

Pilari-laattarunkojärjestelmä on Suomessa yleinen toimisto- sekä liikerakennuksissa käytetty ratkaisu. Järjestelmän laatat voivat olla paikallavalettuja tai elementtejä, joita kannatellaan pilareilla. Pilarien laattoja kantavat päät ovat monesti levennettyjä, niin kutsuttuja vahvistussieniä, joiden tarkoituksena on estää pilarien lävistyminen laatasta. Pilari-laattarakennejärjestelmän rakennukset ovat helposti mallinnettavia sekä taloteknisille ratkaisuille hyvin soveltuvia kokonaisuuksia.

Seinä-laattarunkojärjestelmissä rakennusta jäykistävät kantavat seinäelementit. Välipohjilta kantautuvia kuormia kannatellaan seinien avulla. Seinä-laattarunkojärjestelmä on yksi yleisimmistä Suomessa käytettävistä runkojärjestelmäratkaisuksista, ja sitä hyödynnetään yleisesti useissa erityyppisissä

rakennuksissa, kuten myös asuinkerrostaloissa. Seinä-laattajärjestelmää sovelletaan runsaasti muihin runkojärjestelmämalleihin. On siis hyvin tavanomaista, että esimerkiksi korkean kerrostalon kokonaisrunkojärjestelmään on integroitu seinä-laattarunkojärjestelmän lisäksi useampi runkojärjestelmä.

### 3.1.1 Pilari-palkki-laattarunkojärjestelmä

Diplomityössä luotu laskentaohjelma on suunniteltu laskemaan pilari-palkki-laattarunkojärjestelmiä. Pilari-palkki-laattarunkojärjestelmä on hyvin yleisesti teollisuus- ja varastorakennuksissa käytetty runkoratkaisu. Sitä käytetään myös runsaasti seinä-laattarunkojärjestelmän kanssa asun- sekä toimistorakennuksissa. Puhtaasti pilari-palkki-laattarunkojärjestelmän rakennukset ovat tavallisesti yksikerroksisia halleja. Niiden käyttötarkoitukset voivat rakennuksen elinkaaren aikana vaihdella, joten mahdolliset tilakäyttömuutokset täytyy tilannekohtaisesti rakennesuunnitelmissa huomioida (Elementtisuunnittelu.fi 2010. Teollisuus- ja varastorakennukset, runkojärjestelmät).

Pilari-palkki-laattarunkojärjestelmän rakenteet voidaan jäykistää monella tavalla. Yleensä se toteutetaan useiden jäykistejärjestelmien yhdistelmistä. Yksi yleinen tapa jäykistää rakenteita on käyttää mastopilarijäykistejärjestelmää. Mastopilarijäykistejärjestelmässä pilarit on kiinnitetty jäykästi perustuksiin. Yläpäihin kiinnittyvät palkit toimivat päistään nivellisinä, konsoleilla kannateltavina elementteinä. Laatta toimii levymäisenä rakenteena, mikä jakaa runkoa rasittavia voimia palkeilta pilareille. Jäykistejärjestelminä voidaan myös käyttää jäykisteristikoida sekä seinäjäykisteitä (Elementtisuunnittelu.fi, 2010. Teollisuus- ja varastorakennukset, runkojärjestelmät). Seinäjäykisteet toimivat samalla tavalla kuin jäykisteristikotkin. Ne keräävät rakennukseen vaikuttavat stabiilisuutta heikentävät ulkoiset kuormat ja siirtävät ne elementtien sisäisten voimien avulla perustuksiin. Jäykistejärjestelminä voidaan myös käyttää ydinrunkojärjestelmän tapaisia perustuksiin jäykästi kiinnitettyjä mastojäykisteisiä kuten porras-, huolto- ja hissikuiluja (Vähänen 2019, s.16). Jäykistävässä kuiluissa korkearakenteinen ydin on yleensä rakennuksen ulkolinjojen sisäpuolella. Se kerää jäykisteristikoiden tavoin ympäröiviltä rakenneosilta kantautuvat voimat ja siirtää ne kuilurakenteen sisäisten voimien kautta perustuksiin.

### 3.2 Runkojärjestelmien rakenneosat

Nykypäivänä asuin-, liike- ja toimistorakennuksien välipohja-, ala- tai yläpohjarakenteissa käytetään yleensä ontelolaattoja kantavina esijännitettyinä laattarakenteina. Sen tunnistettavin piirre on, että laattamaista rakennetta on kevennetty pituussuuntaisesti läpäisevillä onteloilla. Ontelolaattojen tyypillinen ominaisuus on, että niitä kannatellaan päistään yhdessä suunnassa yleensä kantavilla seinillä tai palkeilla. Ontelolaatat valetaan tavanomaisesti jäykällä C40–C70 luokkien betonilujuuksilla ja niille on määrätty vakiodusti toimitettavat standardikoot (Elementtisuunnittelu.fi, ontelolaatat). Rakennesuunnittelija määrää ontelolaatastosuunnitelmissaan laattojen mitat, kuormitukset, tuennat, ontelolaatta-asennuksien jälkeiset rakennusta jäykistävät raudoitteet, sauma- ja rengasvaluraudoitteet sekä erilaisten onnettomuustilanteiden varauksien raudoitteet. Ontelolaatastojen suunnittelussa laattojen mitoittavia raja-arvoja arvioidaan tavanomaisesti ontelolaattavalmistajien taipuma- ja kantokykykuvaajien avulla (Parma 2018, s. 4).

Ontelolaattaaja kannatellaan usein palkeilla tavanomaisissa asuin-, liike- ja toimistorakennuksissa. Palkit ovat tavallisesti joko teräsbetonisia suorakaide-, teräsbetonisia leuka-, teräsprofili- ja deltapalkkeja. Deltapalkit ovat teräksisiä laatastoja kannattelevia välipohjaliittopalkkirakenteita, joissa laatat ankkuroidaan tavanomaisesti läpiraudoittein palkkien uumareista. Deltapalkkeja kannatellaan yleensä pilarien kyljistä piilokonsoleilla tai jatkuvissa rakenteissa pilarien päistä. Muut laattoja kannattelevat teräsprofiliipalkit ovat yleensä WQ-palkkeja, putkimaisia- tai hitsattuja profiilipalkkeja. Teräsbetoniset suorakaide- sekä leukapalkit ovat hyvin yleisiä laatastoja kannattelevia rakenneosia. Teräsbetoniset palkit suunnitellaan tavanomaisesti esijännitettyinä. Siinä palkkipunokset esijännitetään vaadittavien laskelmien ja selvityksien mukaisesti, mikä tekee palkeista ulkoisesti lievästi kaarevia, kantokykyä kasvattavia rakenneosia. Esijännitetyt palkit kykenevät pitempiin jänneväleihin kuin esijännittämättömät, siksi niitä yleisesti suositaan asuin-, toimisto- sekä liikerakennuksissa. Teräsbetonisia palkkeja kannatellaan pilareista yleensä ulkoisilla raudoitetuilla teräsbetonikonsoleilla tai teräksisillä piilokonsoleilla. Pilarit suunnitellaan tavanomaisesti asuin-, liike- ja toimistorakennuksiin teräsbetonisina suorakaiteisina ja pyöreäprofiilisina rakenneosina. Pilareita voidaan suunnitella myös teräksisinä tai liittopilareina, mutta niiden hyödyntäminen yhdessä teräsbetonirunkorakenneosien kanssa on harvinaisempaa.

## 4 PARAMETRINEN SUUNNITTELU

Parametrissa suunnittelua käytetään monipuolisesti arkkitehtisuunnittelun apuvälineenä, mutta nykypäivänä sitä on alettu hyödyntämään myös rakennesuunnittelussa. Parametrin suunnittelun etuna ovat parametrin mallin muunneltavuuden helppous, muiden ohjelmistojen vuorovaikutusmahdollisuudet sekä monimutkaisten geometrioiden luominen ja analysoiminen. Parametrin suunnittelusta saatavat hyödyt voivat olla rakennesuunnittelussa huomattavia. Hyvin luodulla mallilla voidaan analysoida rakennukseen tai yksittäisiin rakennusosiin kohdistuvia rasituksien vaikutuksia erittäin objektiivisesti. Tarkasteltavia asioita voivat olla esimerkiksi rakennuksen stabiilisuuden tarkastelu, onnettomuustapauksien analysointi, seismisyysvaikutuksen tutkiminen sekä rakenne- ja materiaalianalyysit. Hyvän parametrin mallin suunnittelu vaatii kuitenkin suunnittelijalta aikaa ja osaamista. Työ voi olla palkitsevaa, kun samoja systemaattisesti luotuja algoritmeja voidaan mahdollisesti hyödyntää muissakin parametrin malleissa.

Parametrin malli perustuu loogiseen algoritmien asetteluun ja yksittäisten parametrin määrittelyyn. Parametreihin liittyvät tapahtumat muodostavat ketjun, mistä muodostuu algoritmi. Parametri voi olla esimerkiksi viivan pituus (Tanska ym. 2014, s. 25). Algoritmi on tapahtumaketju systemaattisesti johdetuista parametreista, millä saadaan luotua esimerkiksi geometrinen malli tai analysoida tapahtuman tulokset. Algoritmi voi olla esimerkiksi palkkien momenttilaskuri. Jokaisella yksittäisellä algoritmilla on tietty yhteys sekä looginen tasapaino muiden algoritmien kanssa. Yhdessä ne muodostavat parametrin mallin. Parametrin malli voi edustaa esimerkiksi rakennuksen geometriaa (Sun ym. 2019).

Parametrin mallin tulokset päivittyvät reaaliajassa. Eri suunnitelmavaihtoehtojen vertailut sekä virheiden paikantamiset on tavanomaiseen tekstimuotoiseen ohjelmointiin verrattuna selkeämpää ja etenkin aloittavalle ohjelmoijalle helpompaa. Parametrin suunnittelu pohjautuu visuaalisen ohjelmointiin. Ongelmien ratkaisut perustuvat visuaalisiin parametrin ja algoritmien vuorovaikutuskentöihin. Parametrin suunnittelu muodostaa taustalle myös tekstimuotoista ohjelmointiskriptiä, mutta käskyjen vuorovaikutukset ovat helpommin todettavissa parametrin suunnittelussa käytettävien ohjelmistokomponenttien avulla. Visuaaliseen parametrin malliin on mahdollista myös sisällyttää tekstipohjaista ohjelmistokriptiä. Diplomityön

laskentaohjelmassa käytetyssä Grasshopperissa sitä on mahdollista luoda VB.netillä, C#-kielellä tai Python-lisäosalla (Tanska ym. 2014, s. 31).

## **4.1 Rhinoceros3D**

McNeel Rhinoceros3D (jatkossa Rhino) on kolmiulotteinen NURBS-teknologiaan perustuva 3D-mallinnusohjelma, mikä käyttää Visual Basic -ohjelmointikieltä. NURBSien (Non Uniform Rational Basis Spline) etuna, muihin geometrisen mallinnuksen menetelmiin verrattuna, on parempi tarkkuus. NURBS- kolmiulotteisissa mallinnusohjelmissa geometriaviivat ja pinnat spesifoidaan ohjelman sisällä matemaattisin perustein, ja eikä mallintajan tarvitse kiinnittää huomiota ohjelman mallinnustarkkuuden laatuun. Verkko- tai hilapohjaisissa ohjelmistoissa geometrian tarkkuus riippuu solmupisteiden määrästä. Verkko- tai hilapohjainen ohjelmisto vaatii käyttäjän määrittämän geometrian verkotusarvon, millä on suora vaikutus mallitarkkuuteen. Liian tiheällä verkotuksella luotu malli hidastaa laskentaprosesseja, kun puolestaan liian harva verkko heikentää geometrian tarkkuutta (Tanska ym. 2014, s. 30).

### **4.1.1 Grasshopper-lisäosa**

Rhinoon on olemassa monia mallinnusta helpottavia lisäosia, joista tunnetuin on ilmaiseksi ladattava Grasshopper. Grasshopper on visuaalinen, käyttäjän luomia algoritmeja analysoiva ohjelma. Algoritmeja muodostetaan Grasshopperin kattavan valikoiman objekteilla, joita käyttäjä loogisesti kytkee objektien välisten riippuvuuksien mukaisesti visuaalisilla viivoilla. Viivat edustavat tiedon suunnan kulkua sekä objektien välisiä suhteita (Tanska ym. 2014, s. 30). Myös objekteista luotuja algoritmeja kytketään samoin periaattein. Tuloksena syntyy parametrinen malli, mikä voidaan helposti muuttaa Rhino-ympäristöön visuaaliseen, helposti tarkasteltavaan muotoon. Grasshopperiin voidaan liittää Excel-tiedostoja sekä siihen voidaan asentaa lisäosia. Lisäosat helpottavat parametrisen mallin luontia ja mahdollistavat parametrisen mallin yhteensopivuuden muihin ohjelmiin, esimerkiksi Teklaan ja RFEMiin. Diplomityölle luotu parametrinen laskentaohjelma on tehty Rhinon ympäristölle, mikä analysoi Grasshopper-laajennusosalla mallille määrättyjä algoritmeja.

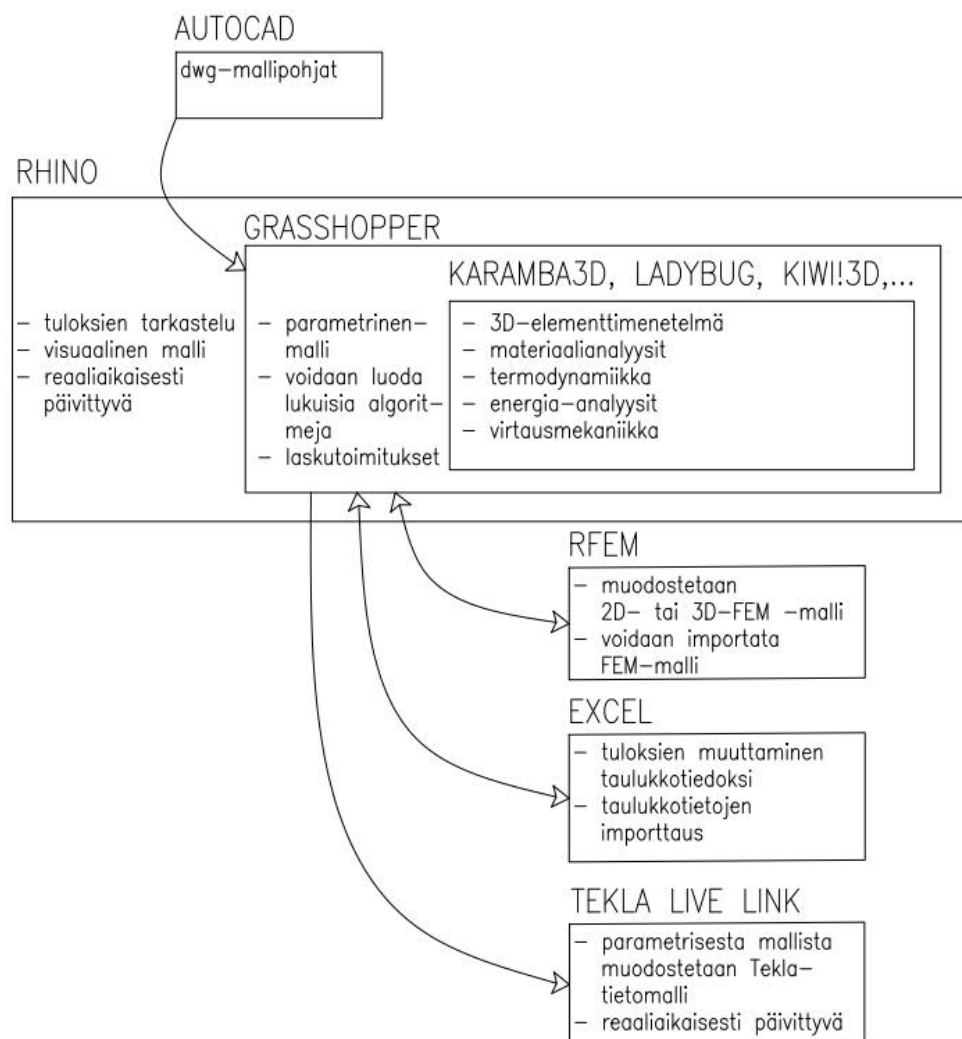
#### 4.1.2 Grasshopperin lisäosat

Yksi hyödyllisimmistä rakennesuunnitteluun kohdistuvista lisäosista on Grasshopperin pohjalla toimiva Karamba3D. Sen objektiyhdistelmillä voidaan helposti muodostaa monimutkaisia suunnittelualgoritmeja, joiden avulla pystytään analysoimaan rakenteita suhteellisen vaivattomasti (Tanska ym. 2014, s. 59). Karamba3D on maksullinen ja sen käyttölisenssejä on rajallisesti saatavissa. Ohjelmistolisäosasta on kuitenkin julkaistu ilmainen objektirajoitettu kokeiluversio. Karamba3D on käyttökelpoinen työkalu teräsrakenteiden sauvojen tarkastelussa, mutta betonirakenteiden analysoinnissa haasteina ovat seinätukien ja tasojen väliset vapautukset. Karamba3D perustuu kolmiulotteiseen elementtimenetelmälaskentaan, mikä takia sillä ei pystytä tarkasti laskemaan tasokuormista palkeille syntyviä kuorma- ja momenttikuvaajia. Ongelmina ovat myös, että Karamba3D:ssä ei pysty luomaan kuormitusyhdistelmiä eikä malliin pysty määräämään viivatuentoja. Koska Karamba3D on FEM-pohjainen työkalu, sillä voidaan mallintaa pistekuormia pelkästään vain verkotuksen solmupisteisiin (Vähänen 2019, s. 34). Laatoilla olevien pistekuormien sijainnit riippuvat laattasolmupisteiden sijainneista, minkä takia muun muassa laatoilla sijaitsevien ei-kantavien väliseinien täytyy mallintua laattakenttien solmupisteiden mukaisesti. Tämä asettaa haasteita tasoja ja tasokuormia sisältävän rakennuksen parametrin mallin sekä parametrin suunnitteluohjelman luonnille.

Muita Grasshopperin yleisesti käytettyjä lisäosia ovat muun muassa Ladybug ja Kiwi!3D. Niiden avulla voidaan parametrisesta mallista tutkia esimerkiksi rakenne- ja materiaalitekniikan ongelmia, termodynamiikkaa ja virtausmekaniikkaa. Käytännössä kaikki nämä toteutukset voidaan tietyllä tasolla suorittaa pelkästään Grasshopperin vakio-objektein luoduilla algoritmeilla. Lisäosien päätavoitteena on kuitenkin yksinkertaistaa mallin algoritmeja ja vähentää niiden luontiin käytettävää aikaa. Tämän diplomityön laskentaohjelmassa ei ole käytetty edellä mainittuja Grasshopperin lisäosia.

Tekla live link on Grasshopperille luotu lisäosa, jossa parametrin mallin tiedot muutetaan Teklassa tunnistettaviksi komponenteiksi. Grasshopperissa Tekla live linkin avulla voidaan määrätä Tekla-mallissa vaadittavat rakenneosakomponenttien tunnukset, nimet ja materiaalit. Ne päivittyvät automaattisesti jokaisen rakenneosan tietoihin, eikä niitä tarvitse Teklassa enää erikseen muuttaa. Grasshopperista Teklaan tuotu malli päivittyy reaaliajassa, kuten Rhinon parametrin mallikin. Tämän diplomityön laskentaohjelmassa on käytetty Tekla live link -lisäosaa.

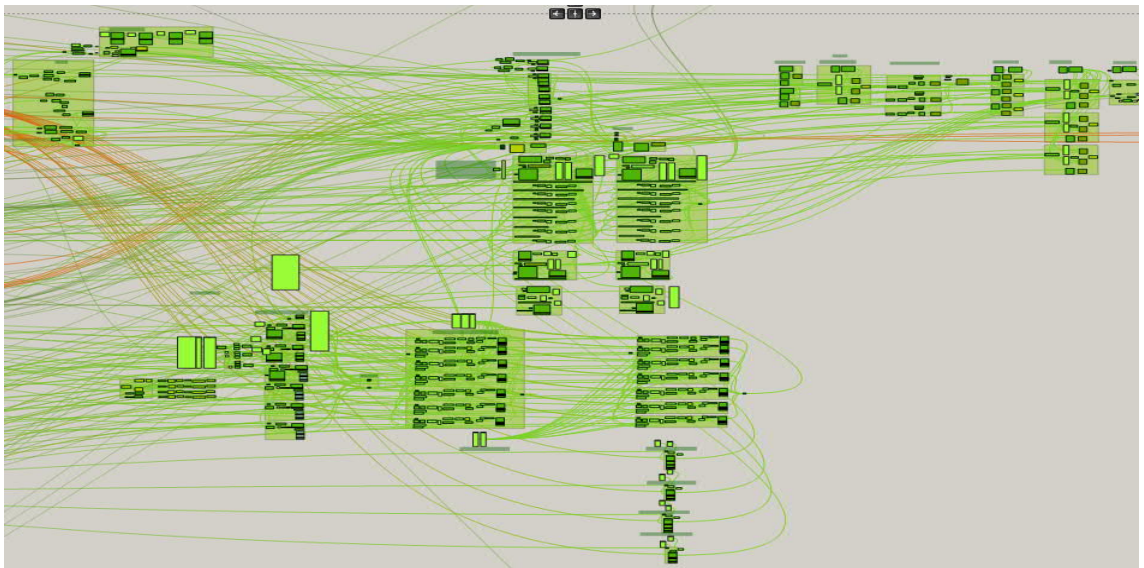
Kuvan 2 kaaviossa on havainnollistettu, miten parametrinen malli voisi kokonaisuudessaan rakentua. Koko parametrinen suunnittelun pohjana on Rhinoceros3D ja sen lisäosa Grasshopper. Grasshopperiin voidaan tuoda 2D-dataa esimerkiksi dwg-tiedostoja, kuten kuvassa on esitetty. Grasshopperin algoritmien laskennan tulokset voidaan muuttaa esimerkiksi RFEM-malliksi tai Tekla-malliksi Tekla live linkin avulla. Laskennan tuloksia voidaan tulostaa Excel-taulukkotiedostoiksi. Grasshopperin lisäosien käyttö riippuu muun muassa mallin vaativuudesta ja niiden hyödynnettävyydestä. Jos mallin ongelmia voidaan analysoida nopeasti Grasshopperin vakio-objekteilla luoduilla algoritmeilla, tulisi maksullisten lisäosien etuja kriittisesti punnita parametrasta mallia muodostettaessa.



Kuva 2. Parametrinen mallin mahdollinen rakenne ja mahdollisuudet. Mallin perustana toimii Rhinon Grasshopper- parametrinen suunnitteluohjelma ja sen lisäosat. Parametrinen mallin tuloksia voidaan hyödyntää useissa eri ohjelmissa, kuten Teklassa, RFEMissä ja Excelissä.

## 4.2 Parametrinen mallintaminen Rhino-Grasshopperissa

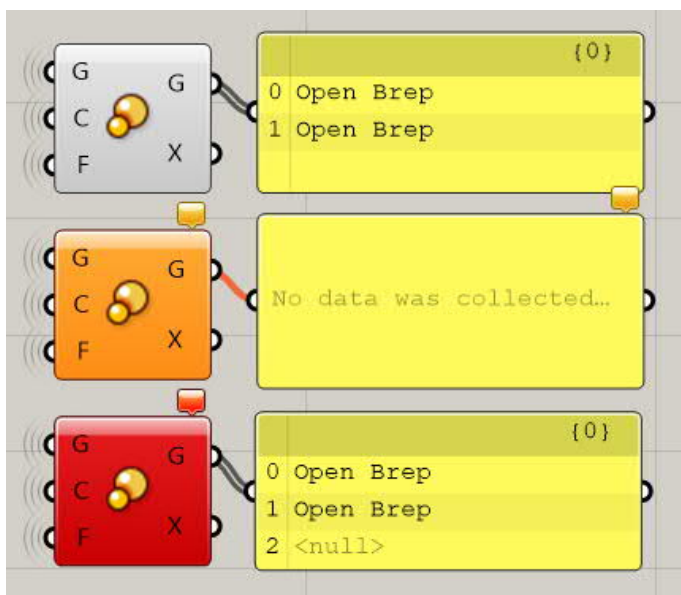
Grasshopperin valikoimasta löytyy runsas määrä erilaisia objekteja algoritmien luontiin. Objekteja ja niiden välisiä suhteita yhdistellään visuaalisin viivoin. Tulokset päivittyvät Rhino-ikkunaan välittömästi objektien välisten suhteiden muuttuessa. Kuvassa 3 on havainnollistettu kuinka moni-ilmeisiksi objektien väliset suhteet voivat suurissa mallissa muodostua. Tavallisesti, kuten kyseisen kuvan mallissakin, suurin osa näkymän viivoista piilotetaan, jotta mallin luonti ja tarkastus olisi selkeämpää.



Kuva 3. Grasshopperin parametrisen mallin algoritmiset suhteet. Kuvan vihreät viivat edustavat piilotettuja objektien välisiä kytkentöjä. Jokainen kytkentä muodostetaan tarkoin määrätyistä objektien suhteista.

Grasshopperin objektityökalut ilmoittavat reaaliaikaista informaatiota, että ovatko yhdistelmät tietomuotoisesti toimivia. Objekti ilmoittaa virheellisen tai ongelmia sisältävän tiedon väritunnisteilla. Ohjelmoijalla on näin ollen, tekstipohjaiseen ohjelmointitapaan verrattuna, helppo työ paikantaa ja korjata virhe. Kuvassa 4 havainnollistetaan kolme erilaista Grasshopper-objektien väritunnistetta.





Kuva 4. Grasshopperin objektien väritunnisteet. Keltainen taulukko kerää objektin välittämän tiedon. Punaiseen objektiin on muilta objekteilta johdettu ylimääräinen `<null>`-nollamääre, jolloin tieto ilmoitetaan objektissa ”virheellisesti” kolmella rivillä.

Harmaa ilmoittaa onnistuneesta kytkennästä. Objektiin syötetty tieto on oikeanmuotoista ja informaation kulku toimii ongelmitta. Oranssi väri informoi häiriöstä. Häiriö voi olla muun muassa objektiin syötetty virheellinen informaatiomuoto. Kuvassa 4 keskimmäiseen skaalausobjektiin skaalausarvoksi (F) syötetty tieto on ilmoitettu pistetietona. Skaalausarvo tulisi olla mikä tahansa numeerinen arvo, mutta seurauksena väärästä informaatiotekijästä, tietoa ei kulje ollenkaan objektin lävitse. Objektia seuraaville algoritmeille välittyy näin ollen virheellistä informaatiota.

Punainen väri ilmoittaa toimintahäiriöstä. Yleensä tällöin tietoa ei kulje objektin lävitse ollenkaan. Mahdollista on, että informaatio jatkaa objektin läpi, mutta se voi sisältää sille virheellistä tietomuotoon kuulumatonta dataa. Virhe voi kostautua muissa objektia seuraavissa algoritmeissa, jos sitä ei hallita oikein.

## 5 TOTEUTUSSUUNNITTELUUN LUOTU PARAMETRINEN LASKENTAOHJELMA

Diplomityölle luotiin parametrinen laskentaohjelma Rhino-Grasshopperilla. Laskentaohjelman toimintaperiaatteisiin etsittiin mahdollisuuksia ja toimintamalleja parametrisen suunnittelun potentiaalista ja sen hyödyntämisestä rakenteiden suunnittelussa. Diplomityössä haluttiin esittää parametrinen laskentaohjelman tulokset visuaalisesti Rhino- sekä Tekla-ympäristöissä. Työn tavoitteena oli määrittää nopeilla sekä luotettavilla laskentamenetelmillä rakenneosien- sekä liitososien dimensiot. Lisäksi haluttiin, että laskentaohjelma visualisoi laskennan tulokset kuorma- sekä momenttikäyrinä. Kaikki laskentaohjelmaan luodut laskentaprosessit haluttiin automatisoida sekä käyttäjän laskentaan vaikuttavia velvoitteita pyrittiin minimoimaan. Käyttäjällä on kuitenkin vastuu määrätä malliin laattojen tasokuormat sekä kerroskorkeudet, jotka asetetaan erilliseen laskentaohjelman avauksen yhteydessä ikkunana ponnahtavaan käyttöjärjestelmään.

Laskentaohjelma on suunniteltu toimiakseen pilari-palkki-laattarunkojärjestelmässä, mutta siihen tullaan lisäämään tulevaisuudessa seinä-laattarunkojärjestelmä - mahdollisuus. Laatat määrätään laskentaohjelmaan yhteen suuntaan kantavina ontelolaattoina. Kerroksille voidaan vapaasti määrätä ei-kantavia tiilirunkoisia väliseiniä, joiden laskennallisesti merkittävät omapainokuormitukset otetaan huomioon rakenneosien dimensioiden mitoituksissa.

Tavoitteena oli luoda helppokäyttöinen, käyttäjäystävällinen laskentaohjelma, jota operoidessa käyttäjällä ei tarvitsisi olla aiempaa kokemusta Rhinoceros3Dn tai Grasshopperin käytöstä. Laskentaohjelmaan ei haluttu sisällyttää liikaa algoritmeja yksinkertaistavia lisäosia. Merkittävin syy siihen on, että monille lisäosille on asetettu käyttöoikeusmäärien rajoituksia, jolloin vaarana voi olla, että osalle käyttäjille ei välttämättä riitä kaikkia ohjelman käyttöön vaadittuja lisenssejä. Jos laskentaohjelmalle on asennettava useita lisäosia toimiakseen, voi se aiheuttaa myös sekaannusta käyttäjissä. Lisäksi haluttiin minimoida maksullisten lisäosien hyödyntäminen, minkä päämääränä oli tehdä ohjelmasta käyttökustannuksellisesti edullisen työkalun.

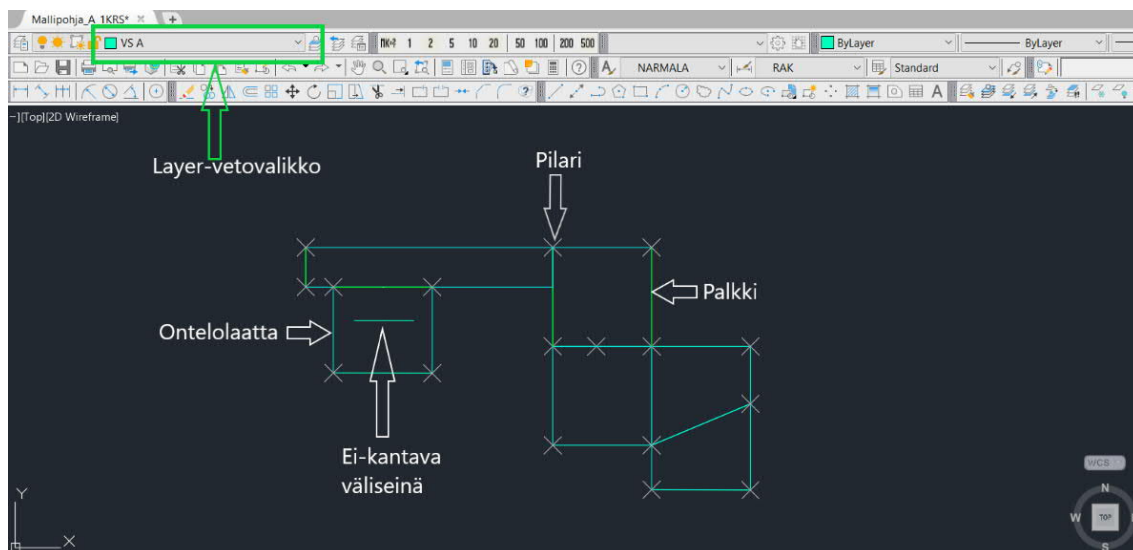
## **5.1 Geometriatietojen määrittäminen parametrisen laskentaohjelmaan**

Grasshopperin laskentaohjelmalle tuodut kerroksien geometriatiedot määritellään erillisissä dwg-muotoisissa tiedostoissa. Geometriatiedot luodaan Autodesk AutoCAD -ohjelmalla, jossa geometriatiedot määrätään kerrosaloittain 2D-pohjaisissa dwg-tiedostoissa. Dwg-mallipohjat tuodaan levytilasta laskurin Grasshopper-ympäristöön, jolloin niiden pohjilta muodostetut laskentatulokset päivittyvät välittömästi Rhino-ikkunaan. Tulokset mallintuvat reaaliaikaisesti myös Teklaan, mikäli rakennuksesta halutaan tehdä tietomalli.

Kerrosalojen geometriatiedot haluttiin luoda erillisille dwg-tiedostoille, koska se on tavanomaisin tyyli, miten arkkitehti esittää suunnitelmansa rakennuksen kerroksista. Arkkitehdin luomia kerrospohjia voidaan helposti ja nopeasti hyödyntää piirtäen päälle määrättyt kantavat rakenteet sekä väliseinät. Dwg-pohjat täytyy toimiakseen kuitenkin luoda laskentaohjelman edellyttämällä tavalla ennen, kun ne tuodaan Grasshopperiin. Mallipohjageometrioiden tuonnit ja muokkaukset on tehty laskentaohjelmassa mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi sisällyttämällä ne ohjelman käyttöjärjestelmään.

### **5.1.1 Geometrian piirtämisen säännöt AutoCADissa**

Mallipohjien geometrioiden mallinnuksessa käytetään ennalta määrättyjä AutoCADin piirustustasoja eli layereitä. Rakenneosien geometriat täytyy piirtää kerrostasolle erillisillä mallipohjien määräämillä layereilla. Esimerkiksi ensimmäisen kerroksen mallipohjalle (A-pohjalle) piirretään palkit: Palkit A-layerilla ja toisen kerroksen mallipohjalle (B-pohjalle) piirretään palkit: Palkit B-layerilla. Samanlaisten rakenneosien, eri tavoin nimettyjä layereita ei pidä sekoittaa mallipohjien välillä keskenään. Muuten sisään luettujen rakenneosien geometriatiedot ovat ristiriidassa kerroksien välillä. Ohjelma lukee tällöin geometrioita väärin eikä mahdollisesti laske kuormia oikein. Kuvassa 5 havainnollistetaan miltä AutoCADilla luotu kerrostason geometria tulisi näyttää.



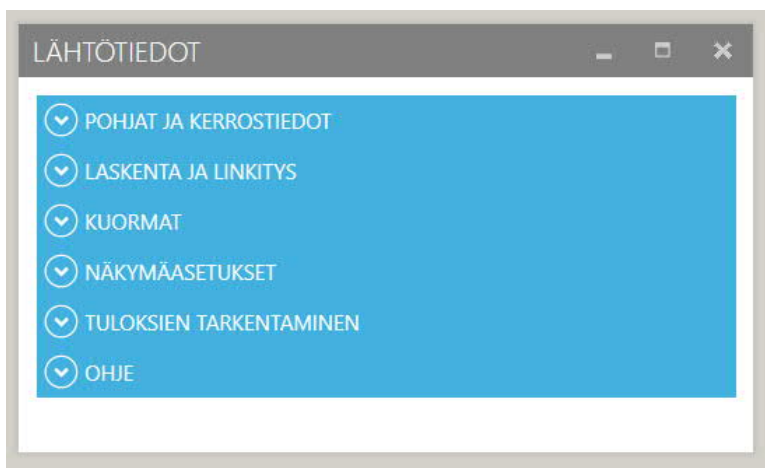
Kuva 5. Dwg-kerrospohjan mallintaminen AutoCADilla. Jokainen rakenneosia täytyy piirtää mallipohjaan määrätyillä piirustuslayereilla. Layerit on valmiiksi eritelty piirustuspohjien layer-vetoalikkoon.

Palkit sekä väliseinät piirretään AutoCADissa viivoina (line-työkalulla) ja ontelolaatta piirretään suljettuna viivana (polyline-työkalulla). Pilarit mallinnetaan pisteinä (point-työkalulla). Edellä mainittujen rakenneosien piirtäminen muilla kuin määrätyillä piirustustyökaluilla sekä layer-tiedoilla aiheuttavat laskentaohjelmassa ristiriitauksia, jolloin ohjelma ei toimi oikein.

Ontelolaatat piirretään niin, että kahden ensimmäisen polylinen pisteiden välinen vektori määrää laatalle kantosuunnan. Ontelolaatat piirretään niin, että jokaiseen niihin liittyvien palkkien pääty pisteisiin klikataan polyline-työkalulla viivan epäjatkuvuuspiste. Laatat voi myös piirtää, että ontelolaatan nurkkapisteet sijaitsevat palkkikentässä. Ontelolaattojen mallinnuksessa on huomioitava, että ontelolaatan epäjatkuvuuspisteet sekä viivat olisivat täsmälleen piirretty palkkiviivojen päälle. Lisäksi kahden tai useamman palkin liittymiskohdat piirretään samaan pisteeseen (snap-komennolla). Ontelolaatalle voidaan mallintaa useampi kuin yksi palkki ja ei-kantavat väliseinät voidaan mallintaa vapaasti kerrosalueelle. Laskentaohjelma löytää, mitkä väliseiniä osat sijaitsevat milläkin laatalle tai palkilla, ja osaa näin hallita niistä syntyviä kuormituksia rakenneosien mitoituksissa. Pilarit piirretään jokaisen palkin päätepisteeseen.

## 5.2 Parametrisen laskentaohjelman käyttöjärjestelmä

Kuvassa 6 on esitetty laskentaohjelman käynnistyksen yhteydessä näytölle ponnahtava käyttöjärjestelmäikkuna. Käyttöjärjestelmään on eritelty kuusi vetovalikkoa, joista käyttäjä hallitsee ohjelman laskentaa sekä tuloksia.

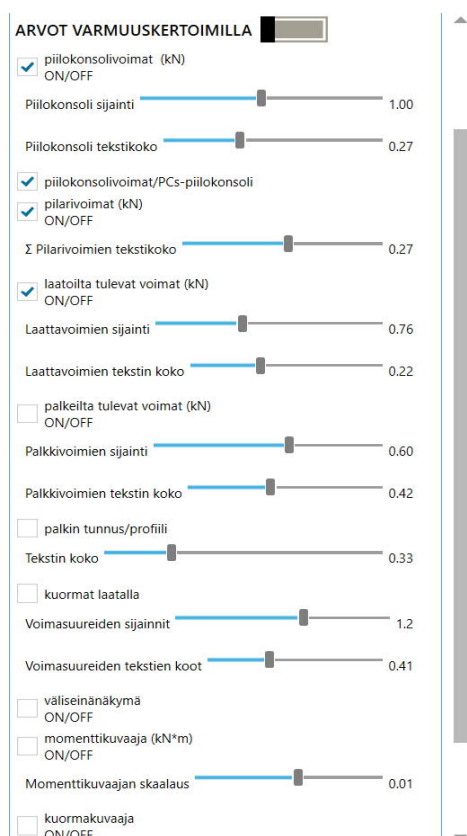


Kuva 6. Laskentaohjelman käyttöjärjestelmä. Käyttöjärjestelmän toiminnot on kategorioitu kuuteen eri vetovalikkoon. Ohje-valikosta löytää apuja näkymäasetuksien hallintaan ja kuormien sekä verkotusarvojen määrittämiseen.

Pohjat ja kerrostiedot -vetovalikosta käyttäjä tuo levytilaan tallennetut dwg-tiedostomuotoiset mallipohjat Rhino-Grasshopper -ympäristöön sekä määrää niille kerroskorkeudet. Painikkeella ”tuo pohjat”, malli päivittyy Rhino-ikkunaan sekä tietomallintaessa Teklaan. Jos mallipohjaan halutaan tehdä muutoksia, niin käyttöjärjestelmän avulla on helppo päivittää uusi mallipohja. Painikkeella ”tyhjennä pohjat” vanha mallipohja poistetaan laskurista ja uusi tallennettu sekä päivitetty pohja tuodaan laskurille ”tuo pohjat” toiminnoilla. Laskenta ja linkitys -vetovalikossa aktivoidaan ohjelman laskenta tuoduille mallipohjien geometrioille.

Kuormat-valikossa laatoille määrätään tasokuormat (muodossa  $\text{kN/m}^2$ ) huomioimatta karakteristisia osavarmuustekijöitä. Käyttäjän on mahdollista valikossa muuttaa kuormayhdistelmien laskennassa vaadittavia seuraamisloukkien sekä rasitusloukkien arvoja. Kaikki vastaavat arvot on nimillä eritelty ja helposti valittavissa erillisistä vetovalikoista. Laskentaohjelma laskee ja valitsee automaattisesti palkin suurinta momenttia vastaavan kuormitusyhdistelmän. Kuormien määrittämiseen on kirjattu erilliset ohjeet, mitkä löytyvät käyttöjärjestelmän ohje-vetovalikosta.

Näkymäasetuksien vetovalikosta käyttäjä pystyy säätämään laskennan tuloksia sekä rakenteiden geometrianäkymiä. Ne päivittyvät reaaliaikaisesti Rhinoon ja Tekla-malliin. Käyttäjää pystyy vertaamaan tuloksia näkymäasetuksien ensimmäisestä kytkimestä. Sillä pystytään visuaalisoimaan malliin karakteristisilla sekä ilman karakteristisilla arvoilla lasketut tulokset. Kytkimen säätöasento ei kuitenkaan vaikuta, millä tavalla palkkien dimensiot tai piilokonsolien koot on ohjelmassa iteroitu. Kytkin muuttaa vain kuorma- ja momenttiarvojen visuaalisia näkymiä. Kuvassa 7 on kuvakaappaus näkymäasetukset-vetovalikon säätövalikoimista.



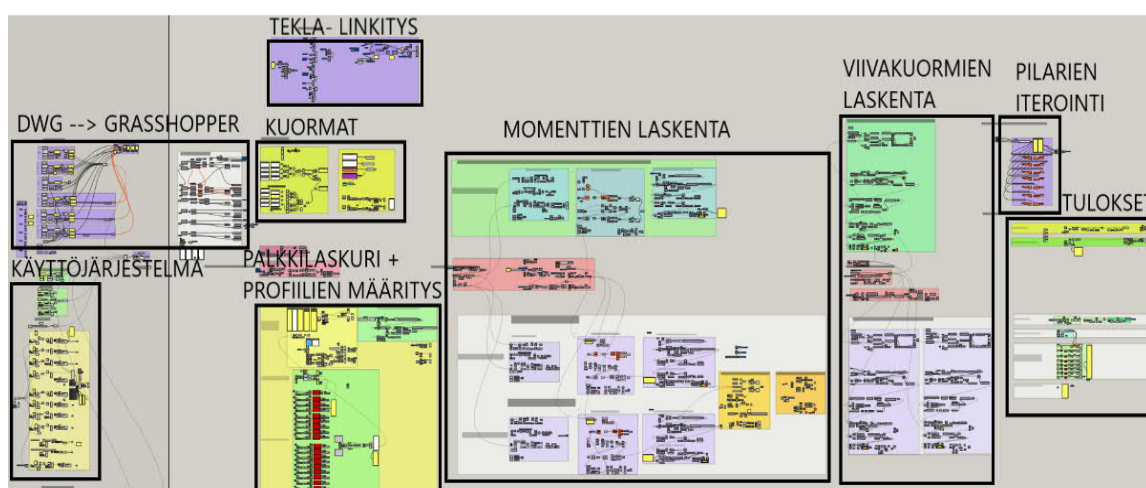
Kuva 7. Laskentaohjelman käyttöjärjestelmän näkymäasetukset. Siinä voidaan aktivoida laskentatuloksien näkymien lisäksi yleisiä mallinäkymiä, kuten tasokuorma- ja väliseinänäkymiä. Siinä pystytään myös muokkaamaan mallissa esitettävien tuloksien tekstikokoja ja sijainteja.

Tuloksien tarkentaminen -vetovalikossa käyttäjä määrää laattojen verkkojaon arvon sekä momentti- että kuormakuvaajien laskennassa huomioon otettavien palkkien jakopisteiden lukumäärän. Arvojen muuttaminen voi tarkentaa tuloksia. Jos laatat ovat yksinkertaisia, esimerkiksi suorakulmaisia päistään yhdellä palkilla tuettuja, ei verkkojaon arvon vaihtelulla ole juurikaan merkitystä laskennan tuloksissa. Palkkijakoarvon kasvattaminen vähentää momentti- ja kuormakuvaajien kulmikkuutta. Palkkijakoarvo olisi hyvä pitää riittävän suurena, jottei esimerkiksi palkkien paikallisia momenttipiikkejä jäisi laskennasta huomioimatta. Ohje-valikossa on kerrottu, millaisia arvoja rakenteille tulisi

määrätä, jotta saataisiin luotettavia tuloksia. Tavallisesti molemmille riittää luku kymmenen tai suurempi positiivinen reaaliluvun arvo. Liian suuri arvo hidastaa laskentaa, ja luvulla 30 laskennan hidastuminen on jo selvästi havaittavaa.

### 5.3 Suureiden laskenta parametrisessa laskentaohjelmassa

Laskentaohjelma koostuu useista algoritmeista muodostetuista laskureista. Niitä havainnollistetaan kuvassa 8, mikä on kuvakaappaus diplomityön laskentaohjelman Grasshopperin parametrisesta mallista. Laskennan osaprosessit on kuvaan laatikoitu ja niille on lyhyesti otsikoitu algoritmiset merkitykset. Jokainen laskennan osaprosessi ottaa huomioon ympäriltä tulevan informaation, joissa tiedot käsitellään ja siirretään eteenpäin muihin laskureihin. Jokaisen laskurin algoritmin ja parametrin täytyy toimia suhteessa toisiinsa moitteettomasti. Yksikin poikkeama tai vääränlainen informaatiomuoto voi sekoittaa laskennan logiikan, mikä voi tehdä laskurista hyödyttömän. Kuvan 8 parametrinen malli on määritelty yhdelle sisään luettavalle kerrostason dwg-tiedostolle. Muiden rakennuksen kerroksien mallit ovat käytännössä supistettuja osakopioita kuvassa esitetyistä laskureista. Niissä vain poikkeavat geometrioiden lähtötietojen layer-datat. Jokaisen kerroksen tietoja ohjataan samalla käyttöjärjestelmällä. Käyttäjän ei siis tarvitse laskuria operoidakseen perehtyä Grasshopper-malliin ollenkaan, vaan laskentaa ohjataan ainoastaan käyttöjärjestelmän avulla erillisessä ikkunassa.



Kuva 8. Diplomityön laskentaohjelman Grasshopper- parametrinen malli. Laskentaohjelman algoritmiset laskurit on kuvassa otsikoilla eritelty. Jokaisen laskurin tulokset johdetaan tulokset-osioon, josta ne muutetaan Rhinoon visuaallisiksi näkymiksi. Tekla-linkityksessä malli muutetaan Tekla-yhteensopivaksi.

### 5.3.1 Kuormitusyhdistelmien määrittäminen

Laskentaohjelmassa kerrostasojen kuormille on määrätty kaavojen (1) ja (2) mukaiset STR-murtorajatilan kuormitusyhdistelmät (RIL-201-2011, s. 38).

$$1,15 \cdot K_{FI} \cdot \sum G_{k,j} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,I} , \quad (1)$$

mutta minimissään

$$1,35 \cdot K_{FI} \cdot \sum G_{k,j} , \quad (2)$$

joissa  $K_{FI}$  on kuormakerroin,  
 $G$  on pysyvät kuormat,  
 $Q$  on muuttuvat kuormat ja  
 $\psi$  on kuormitusyhdistelmien pienennyskerroin.

Pysyviä kuormia ovat yleensä rakenteiden omista painoista syntyvät kuormat. Muuttuvia kuormia ovat rakenteisiin kohdistuvia vaihtuvia kuormituksia, jotka koostuvat esimerkiksi lumesta, tuulesta, koneiden-, ajoneuvojen- tai henkilöpainoista. Kuormakertoimien arvot määräytyvät seuraamusluokkien perusteella siten, millaisia sosiaalisia, hengenvaarallisia, taloudellisia tai ympäristövahingollisia vaikutuksia rakenteiden sortumisilla on.  $K_{FI}$ -arvoina käytetään kolmea erilaista määritelmää:  $K_{FI} = 0,9$  (CC1=vähäinen merkitys),  $K_{FI} = 1$  (CC2=keskisuuri merkitys) ja  $K_{FI} = 1,1$  (CC3=suuri merkitys). Kuormitusyhdistelmien pienennyskerroin määräytyy tilojen käyttötarkoitusten sekä kuormitustyyppien mukaan (RIL-201-2011, s. 37).

Sekä  $K_{FI}$ - ja  $\psi$ -arvot on käyttäjän vastuulla valittavissa laskentaohjelman käyttöjärjestelmässä. Kuva 9 on kuvakaappaus käyttöjärjestelmän kerroksen kuormienmääritysikkunasta. Siinä käyttäjän on mahdollista määrittää kahdesta vetovalikosta  $K_{FI}$ - ja  $\psi$ -arvojen suureet, joita ohjelma käyttää kuormitusyhdistelmien laskennassa.



1. KRS. MÄÄRITÄ KUORMAT

CC2: 1 (tavanomaiset rakenteet) B:  $\psi 0 \mid 0.7$  Päivitä

B:  $\psi 0 \mid 0.7$   
 B:  $\psi 1 \mid 0.5$   
 B:  $\psi 2 \mid 0.3$   
 Luokka C: kokoontumistilat  
 C:  $\psi 0 \mid 0.7$   
 C:  $\psi 1 \mid 0.7$   
 C:  $\psi 2 \mid 0.6$   
 Luokka D: myymälätilat  
 D:  $\psi 0 \mid 0.7$   
 D:  $\psi 1 \mid 0.7$   
 D:  $\psi 2 \mid 0.6$   
 Luokka E: varastotilat  
 E:  $\psi 0 \mid 0.7$

G1	G2	G4	MAÄRÄÄ LAATALLE
Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Laatta (nro.)   Kuormamalli (nro.)
0	0	0	0 1
1 1	1	1	1 1
2	2	2	2 1
3	3	3	3 1
4	4	4	4 1
5	5	5	5 1
6	6	6	
7	7	7	
8	8	8	
9	9	9	
10	10	10	

Q1	Q2	Q3	Q4
Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)	Kuormamalli (nro.)   Kuorma (kN/m2)

Kuva 9. Tasokuormien määrittäminen laskentaohjelman käyttöjärjestelmässä. Erillisten vetovalikoiden avulla pystytään määrittämään kuormille seuraamusluokat ja pienennyskertoimet. Kuormat määrätään jokaiselle laatalle erikseen. Sille on annettu selkeät ohjeet käyttöjärjestelmän ohje-vetovalikossa.

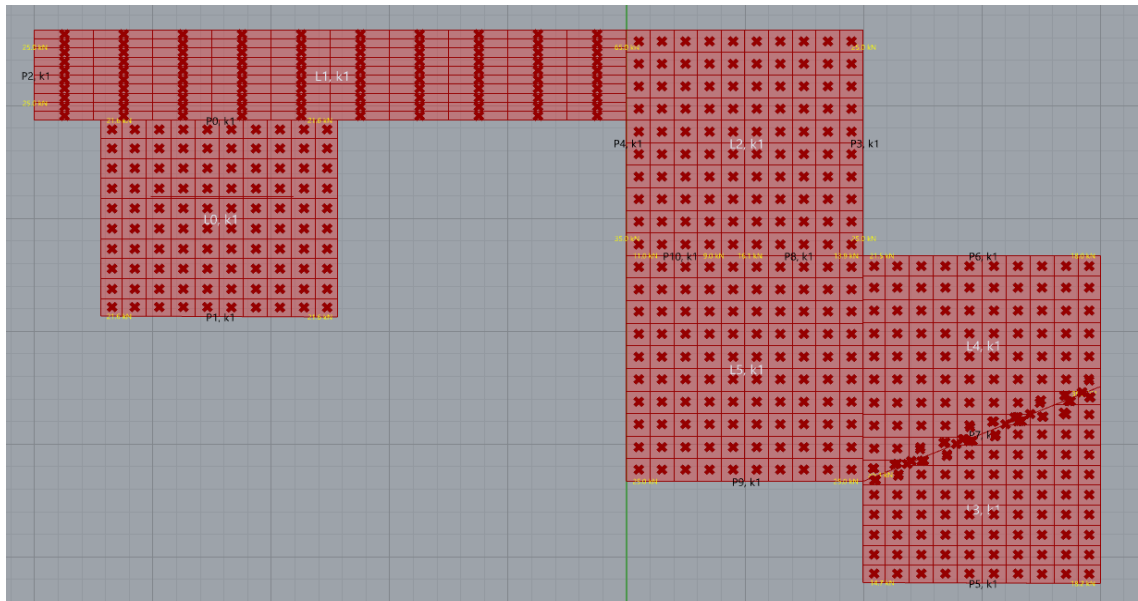
Palkkien karakterististen reaktiovoimien sekä kuormakuvaajien tulokset lasketaan maksimimomenttiarvojen määrittämien kuormitusyhdistelmien mukaan. Laskentaohjelma laskee palkkien maksimimomentit edellä esitettyjen kaavojen STR-murtorajatilayhdistelmillä (kaavat (1) ja (2)), joista suurimmat saadut maksimimomenttiarvot valitaan mitoittaviksi tekijöiksi.

### 5.3.2 Yhteen suuntaan kantavien laattojen tasokuormien jakautuminen

Ohjelma laskee yhteen suuntaan kantavien laattojen kuormituksia, jotka yleisesti ovat ontelolaattoja. Laskentaohjelmaa varten haluttiin löytää yksinkertainen automatisoituva laskentametodi, jolla voidaan määrittää laattojen tasokuormien jakautuminen kantaville palkeille. Diplomityössä päädyttiin hyödyntämään laattojen omiin geometriatietoihin perustuvaa käsinlaskentamenetelmää, mikä käyttää tavanomaisessa käsinlaskentamenetelmässä soveltuvia menetelmiä.

Kun käyttöjärjestelmässä on jokaisen kerroksen laatalle määrätty tasokuormat, ohjelma verkottaa laatat käyttäjän määräämällä verkotusarvolla. Edellä, laskentaohjelman käyttöjärjestelmä -luvussa, mainittu arvon kymmenen verkotus vastaa mallissa kuvan 10

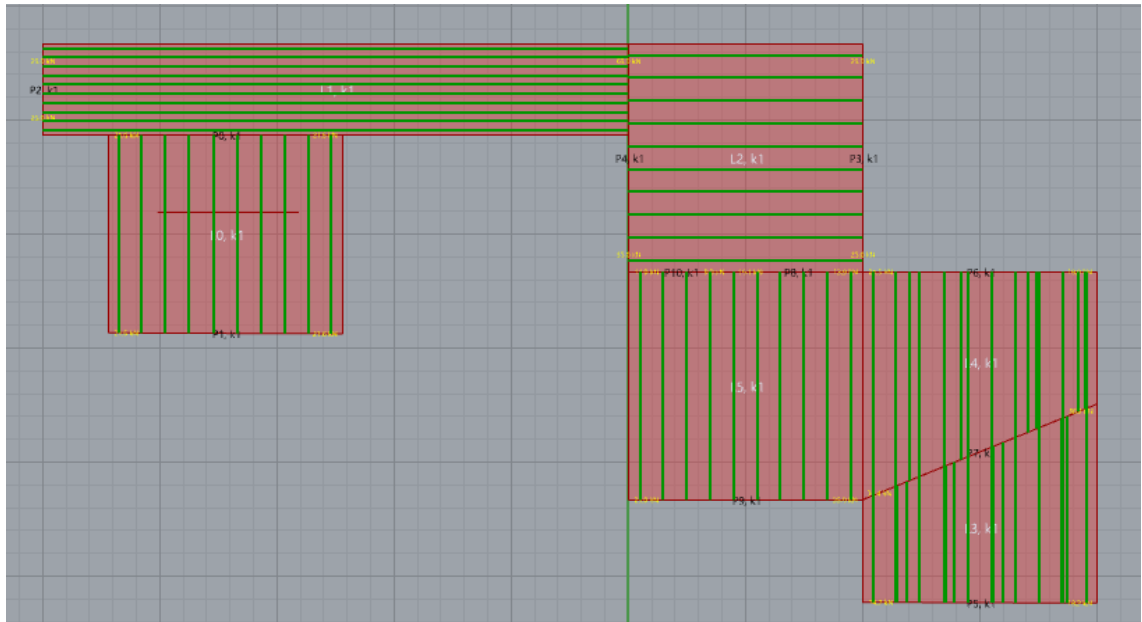
mukaista laattaverkotusta. Laatta jaetaan x- ja y-suunnassa kymmeneen osaan, jolloin jokaiseen laattaan muodostuu 100 pientä ruutua.



Kuva 10. Laattojen jako verkotusarvon mukaisiksi ruudukoiksi. Ruutujen painopisteisiin lasketaan ruutujen kokoja ja laatalle määrättyä tasokuormaa vastaavat pistevoimat.

Ohjelma laskee jokaisen laatan verkotusruudun pinta-alan ja kertoo arvon laatalle asetetulla tasokuormalla ( $\text{kN/m}^2$ ). Tuloksena saadaan pistekuorma, joka määrätään jokaisen verkotusruudun painopisteeseen. Kuvassa 10 rastilla merkityt paikat ovat ruutujen suuruuksien suhteessa määrättyjä pistekuormia.

Laskentaohjelma tunnistaa, mitkä pistekuormat kuuluvat millekin laatalle. Seuraava laskennan vaihe on määrittää kuormien jakautumiset palkeille. Kuormat kantautuvat palkeille laattojen kantosuunnissa kuvan 11 mukaisesti. Kuvan kantosuuntaviivat on muodostettu jokaisesta laattakentän pistevoimien vaikutuspisteistä.



Kuva 11. Laattakenttien pistekuormien vaikutuspisteistä muodostetut kantosuuntaviivat. Viivojen suunnat määräytyvät laattojen piirustustavan perusteella AutoCADissa.

Pistekuormien sijaintien sekä kuvan 11 viivojen suuntaisten vektoreiden avulla, määritetään jokaiselle pistekuormalle palkeille suhteutetut etäisyyksien prosenttiosuuksien arvot. Prosenttiosuudet ilmoitetaan niin, että suuremmalle etäisyydelle määrätään pienempi kuormaosuuden siirtymiseen vaikuttava prosentuaalinen arvo. Kuvassa 12 havainnollistetaan yhden laattakentän ruudukon pistekuorman vaikutuksen jakautuminen laattaa päistään kantaville palkeille.

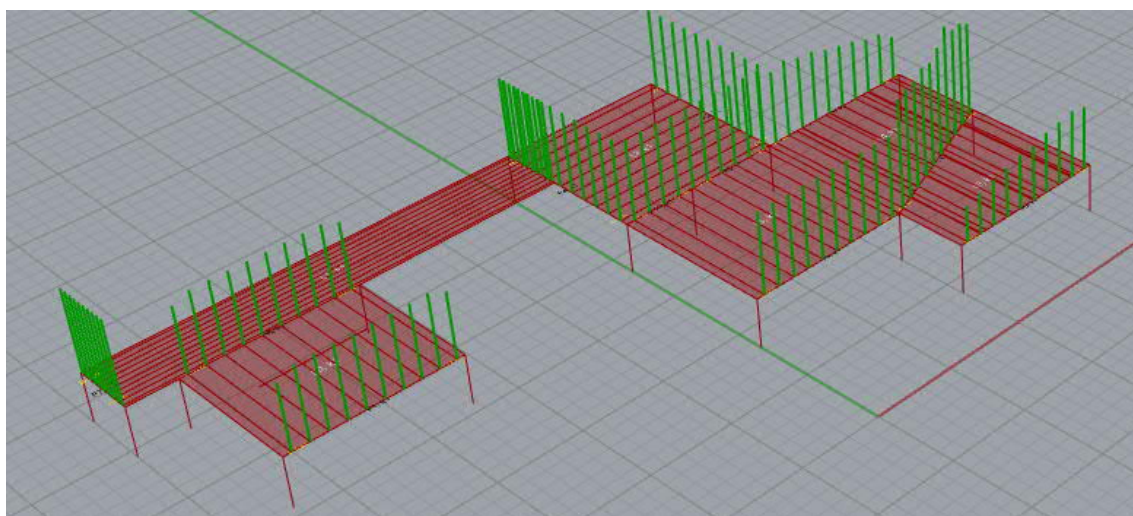


Kuva 12. Laattakentän pistekuorman kantautuminen palkeille. Jokaisesta laatan pistekuorman vaikutuspisteestä lasketaan palkkietäisyyksiin suhteutetut prosenttiosuudet. Prosenttiosuudet kerrotaan pistekuorma-arvoilla, joiden suuruudet johdetaan laatan kantosuunnassa palkeille.

Jos laatan kantosuuntaan suhteutettuna keskellä sijaitsee  $0,1 \text{ m}^2$ :n suuruinen verkotuksella muodostettu laattakentän ruutu ja kyseiselle laatalle on määrätty  $1 \text{ kN/m}^2$  suuruinen tasokuorma, ruudun painopisteessä vaikuttaa  $0,1 \text{ kN}$ :n suuruinen pistevoima. Prosenttiosuuksien suhteiden ollessa 50–50 prosenttia, laattaa päistään kantaville palkeille syntyy ruudusta  $0,05 \text{ kN}$ :n suuruiset pistevoimat. Pistekuormien sijainnit määräytyvät palkkikentän pisteisiin, joihin laattojen kantosuuntaviivat (kuva 11) leikkaantuvat.

Viisteisten laattojen tapauksissa palkkien pistekuormista johdetut laskentatulokset voivat tarkentua, kun verkotusta kasvatetaan. Tulokset tarkentuvat etenkin silloin, kun laatan päätä kantaa kaksi erillistä palkkia. Tämä johtuu siitä, että liian harvalla verkotuksella laattakentistä muodostetut kuormat voivat jakaantua epätasaisesti palkin kentälle. Laattakentän pistekuormat on tällöin määrätty liian harvalle alalle, jolloin esimerkiksi toiselle lyhyemmälle laatan reunaa kannattelevalle palkille voi siirtyä kuormia liian vähän tai epätasaisesti. Kun verkkomäärää kasvatetaan, pistekuormia muodostuu palkeille tasaisemmin ja tulokset tarkentuvat.

Kuvassa 13 palkeille kantautuvat pistekuormat on esitetty kuormavektoreina. Kuormat on määritetty edellä selitetyllä prosenttiosuusmenetelmällä laattakentän verkotuksella luotujen ruutujen pistekuormista. Palkeille kantautuvat pistevoimat on summattu yhteen samoissa palkkikentän pisteissä, joissa laattakenttien pistevoimista piirretyt kantosuuntaviivat leikkaavat.



Kuva 13. Palkkien pistekuormat. Vihreät kuormaviivojen pituudet edustavat laatoilta kantautuvien pistekuormien suuruuksia.

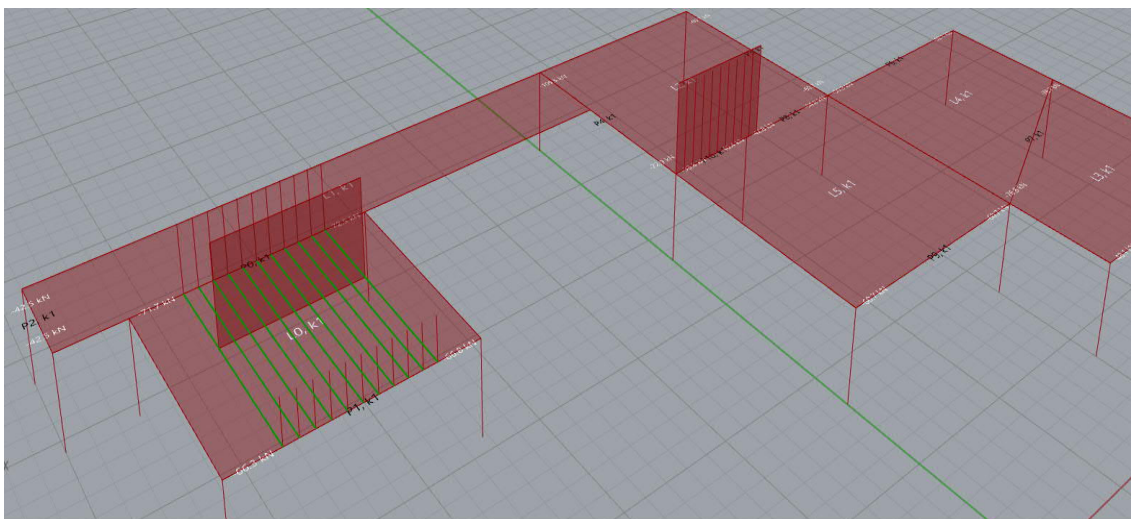
### 5.3.3 Ei-kantavien väliseinien ja palkkien omapainokuormien jakautuminen

Ei-kantavien väliseinien ja palkkien omapainokuormien jakautumiselle sovelletaan samaa prosenttiosuusmenetelmää, mitä on käytetty laattojen tasokuormien laskennassakin. Kuvassa 14 esimerkkimallin kerrostaosolle on määrätty kaksi väliseinää. Toinen sijaitsee 0-laatan kentässä ja toinen suoraan 5-laattaa kantavien palkkien päällä. Ei-kantaville väliseinille määrätään kerroskorkeuden mukaan viivakuorma-arvo (kN/m), minkä ohjelma paloittelee pistekuormiksi. Se kuinka moneen pistekuormaan seinän viivakuorma jaetaan, määräytyy käyttäjän käyttöjärjestelmässä asettaman verkotusarvon mukaan.

Kuvasta 14 nähdään, kuinka samalla tasokuormalaskennan mukaisella tavalla väliseinäkuormia hallitaan palkeille. Väliseinäpistevoimat siirretään kantosuuntaviivojen suuntaisesti laattaa kantaville palkeille, joihin on laskettu pistekuormien sijainneista riippuvat prosenttiosuuksien arvot. Kuvassa 14 laattalla 0 sijaitseva väliseinä on kauempana P1-nimettyä palkkia, joten kuormavektorit ovat laskentalogiikan mukaan oletetusti pienemmät, mitä ne ovat laattaa toisesta päästä kantavan palkin kentässä.

Ontelolaatat siirtävät kuormia palkeille yhdessä suunnassa. Se perustuu siihen, että niillä on kantosuunnassa merkittävän suuri ortotrooppinen jäykkyys. Todellisuudessa kuormat jakautuvat ontelolaatoilla myös poikkisuuntaan. Se, kuinka merkittävästi ontelolaatan punoksilla pystytään poikkisuunnassa kuormia kantamaan, on pääsuuntaan suhteutettuna hyvin pientä. Tästä syystä laskentaohjelma ei ota huomioon ontelolaattojen homogeenista kuormien jakautumisen vaikutusta.

Laskentaohjelma lukee lähdegeometrian ja erottelee mallinnettujen väliseinien tai väliseinäosien pistevoimat niihin, mitkä sijaitsevat laattojen- tai palkkien kentissä. Pistevoimat, mitkä sijaitsevat suoraan palkkien päällä, jakautuvat prosenttiosuudellisesti täysin niitä kantaville palkeille. Kuvassa 14 havainnollistetaan kuinka ei-kantavien väliseinien kuormat jakautuvat palkeille kummassakin tapauksessa.

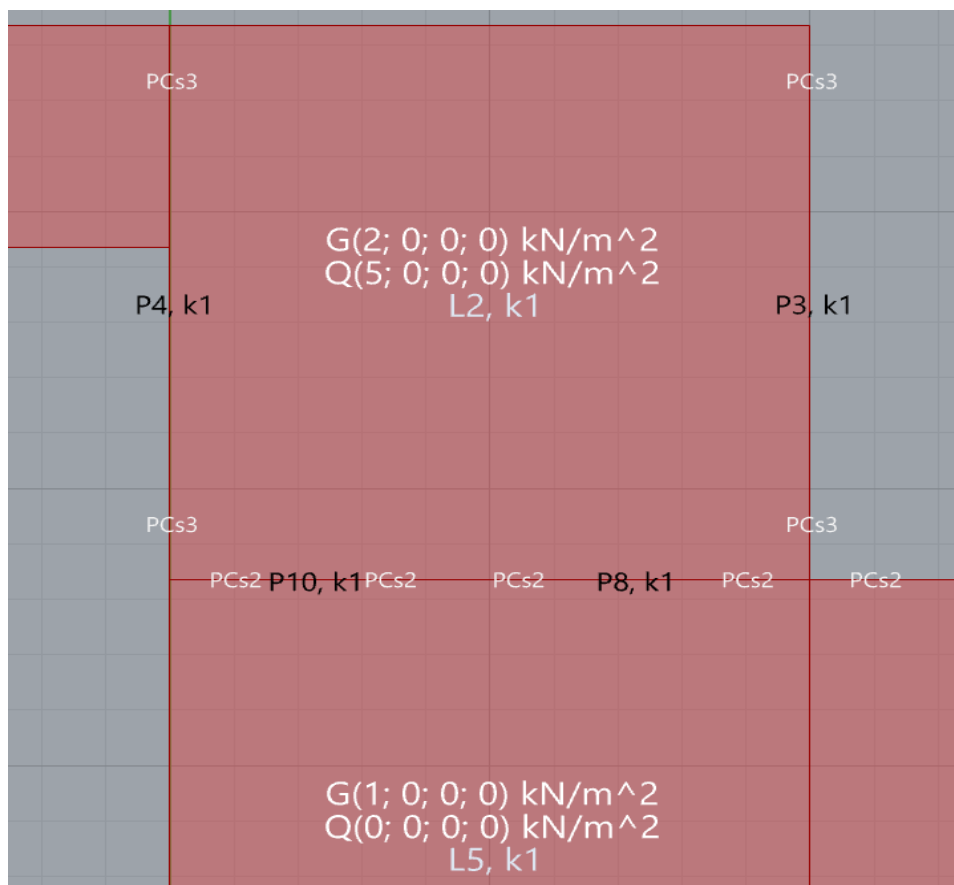


Kuva 14. Ei-kantavista väliseinistä palkeille syntyvät kuormitusvektorit. L0-laatta sijaitsee kuvan vasemmassa laidassa. L0-laattalla oleva tiiliväliseinä sijaitsee lähempänä laattaa toisesta päästä kantavaa palkkia, joten kuvan alareunan P1-palkille siirtyy vähemmän kuormia. Tästä syystä P1-palkin kuormaviivat ovat matalempia kuin mitä ne ovat laattaa toisesta päästä kantavalla palkilla.

Palkkien omien painojen kuormat muodostetaan samalla tavalla, kuten ei-kantaville väliseinillekin. Palkeille on erillisessä ohjelman algoritmissa iteroitu teräsbetonipalkkiprofiilit, mille lasketaan viivakuorma (kN/m). Sen jälkeen palkin viivakuorma jaetaan pistekuormiin. Jaon arvoksi on vakioitu kymmenen, mikä ei ole käyttöjärjestelmässä muunneltavissa. Palkin pistekuormajaon vaihtelulla ei tuloksien kannalta ole merkitystä. Kymmentä suuremmalla palkkijaon arvolla tulokset ovat lähes muuttumattomia. Arvon kasvattaminen ei myöskään vaikuta merkittävästi momentti- tai kuormakuvaajien tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että palkkijaon arvolla (kymmenen) viivakuormasta muutetut pistekuormat jakautuvat riittävän tiheästi ja tasaisesti palkkikentille.

#### 5.3.4 Reaktivoimien määrittäminen sekä piilokonsolien iterointi

Laskentaohjelma määrittää palkeille automaattisesti piilokonsolien koot ja tulokset näkyvät graafisesti Rhinossa ja Teklassa. Kuvassa 15 on havainnollistettu esimerkkimallipohjan PCs- piilokonsoli-iteroinnin tulokset. Konsolien laskentaa voidaan soveltaa myös muille konsolityypeille, kuten betonikonsoleille.



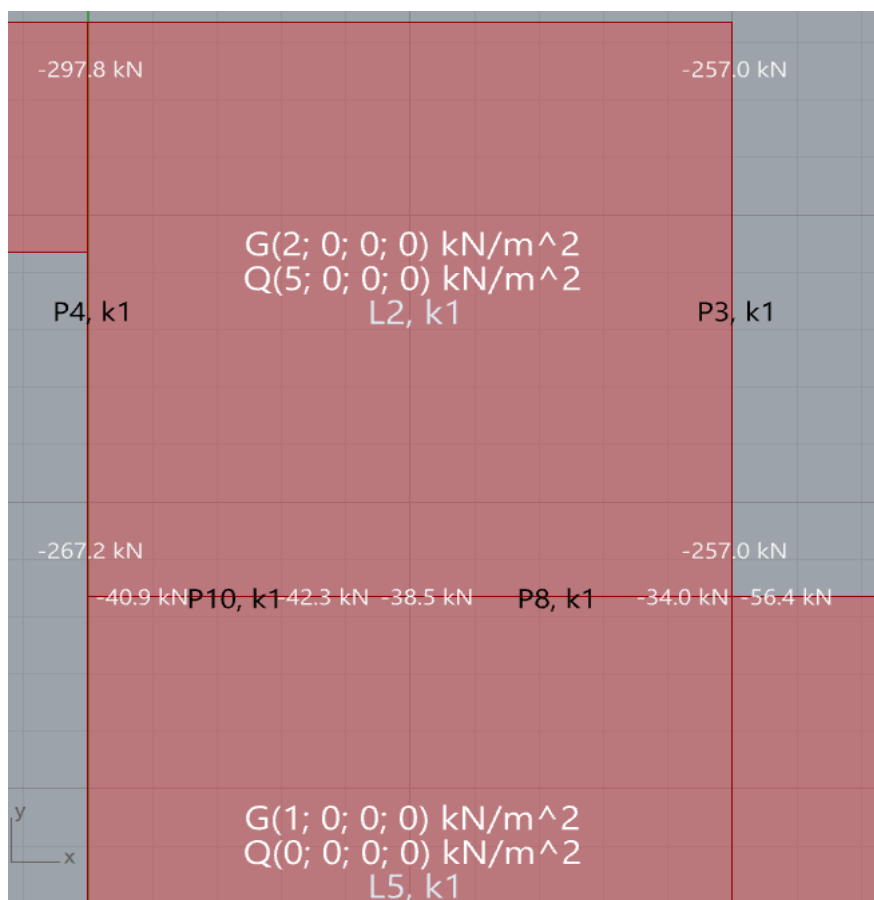
Kuva 15. PCs-piilokonsolilaskennan tulokset Rhinossa. Piilokonsolit on kuvassa ilmoitettu palkkien pääty pisteissä. Palkit on nimetty kuvaan P-alkuisina tunnisteinä. Laattojen tasokuormat on myös kuvassa ilmoitettu.

Ennen piilokonsolikokojen iterointia täytyy määrittää palkkikenttien pistekuormista aiheutuvat palkkien pääty pisteiden reaktiovoimat. Nyt palkkikenttien prosenttiosuuksien pistevoimille sovelletaan uudelleen samaa prosenttiosuusmenetelmää. Erona edelliseen on, että prosenttiosuudet lasketaan nyt palkin pääte pisteisiin. Eli, jos palkille aiemmin laattakentän pistekuormista muodostettu pistekuorma sijaitsee palkkikentän keskellä, niin kuorma jakautuu laskentalogiikan mukaan puoleksi kumpaankin palkin pääty pisteeseen. Tässäkin tapauksessa prosenttiosuudet on määrätty niin, että lyhyemmälle vektorille (kuorman vaikutuspisteestä palkin pääty pisteeseen) on pituuden suhteen asetettu suurempi prosentuaalinen arvo, kuin vastaavan kuorman vaikutuspisteestä muodostettavalle pitemmälle vektorille.

Palkkikenttään voi syntyä kaikilta kolmelta tekijältä (laatoilta, palkeilta, ei-kantavilta väliseiniltä) johdettuja erisuuruisia pistekuormia. On tavanomaista, että ei-kantavilta väliseiniltä kantautuvat kuormat jakaantuvat epätasaisesti palkkien kenttiin. Palkeille saattaa siis syntyä ei-kantavilta väliseinistä suuria yksittäisiä pistevoimia, mitkä ovat summauksia samojen kantosuuntaviivalinjojen kuormien prosenttiosuuksien arvoista.



Laskentaohjelma ottaa reaktiovoimien prosenttiosuyslaskennassa huomioon palkkien kentissä tapahtuvat pistekuorma-arvojen suuruuksien vaihtelut sekä kuormitusepäsymmetrisyydet. Kaikki palkeille vaikuttavat kuormat on yhdenmukaistettu pistekuormiksi, joista on muodostettu palkkikohtaiset pistekuormajoukot. Jokaisesta yksittäisestä pistekuormasta lasketaan voimien prosenttiosuudet palkkien päihin, joissa ne summataan. Näin saadaan luotettavasti piilokonsolien valinnassa käytettävät mitoittavat leikkausvoima-arvot (kuva 16) riippumatta palkkikenttäkuormien jakautumisen epäsymmetrisyyksien ja suuruusvaihtelujen vaikutuksista. Kuvassa 16 P10-palkin päällä vaikuttaa lähes koko matkalta ei-kantava väliseinä (kts. kuva 14), mikä ulottuu osittain P8-palkin päälle. Väliseinät ja palkit on piilotettu kuvan 16 tuloksien näkymästä. Kuvassa kaksi laattaa kuormittaa epätasaisesti P4-palkkia kummaltakin puolelta. Ohjelma ottaa tällaisista tapauksista johtuvat epäsymmetriset kuormitustekijöiden vaikutukset huomioon varsin luotettavasti. Kuvan reaktiovoimien tulokset on laskettu harvahkolla 10x10-verkotuksella. Laskennan tuloksia tarkastellaan tarkemmin myöhemmin tuloksien tarkastelu -luvussa.

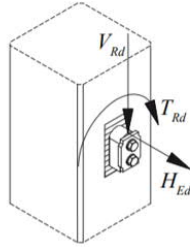


Kuva 16. Reaktiovoimien tulokset Rhinossa. Voimat on kuvassa ilmoitettu palkkien pääty pisteissä. Palkit on nimetty kuvaan P-alkuisina tunnuksina. Laattojen tasokuormat on myös kuvassa ilmoitettu.



Piilokonsolien valinnoissa käytetään Peikko Finland Oy:n taulukkotietoja. Kuvassa 17 on Peikon ohjeistus, kuinka piilokonsoli tulisi määrätyillä taulukon arvoilla valita.

PCs®-konsolin kestävyys (vaakasuuntaisen vetokuormituksen kanssa  $H_{Ed} = 0.2 \times V_{Rd}$ ).



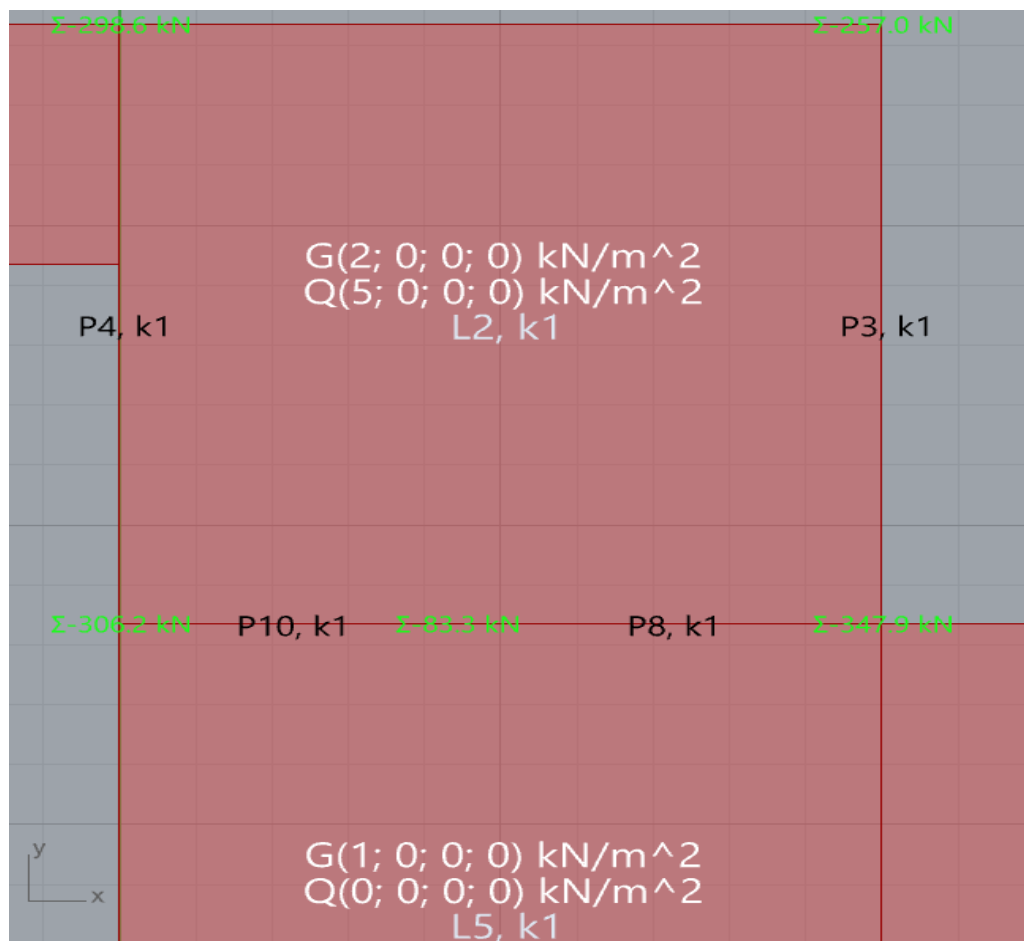
Kuorma		Yksikkö	PCs 2	PCs 3	PCs 5	PCs 7	PCs 10	PCs 15
Pystykuorma	$V_{Rd}$	kN	210	355	520	710	960	1500
Vaakakuorma	$H_{Ed}$	kN	42	71	104	142	192	300
Vääntö	$T_{Rd}$	kNm	7	15	25	50	75	170

Kuva 17. Piilokonsolien iterointitaulukko (Peikko Group 2019). Laskentaohjelman piilokonsoli-iteroinnissa hyödynnetään taulukon ensimmäisen rivin  $V_{Rd}$  pystykuorma-arvoja. Ne kuvaavat palkkien pääty pisteissä sallittuja leikkausvoimia (reaktiovoimia).

Ohjelma iteroi lasketuista reaktiovoimatuloksien arvoista kuvan 17 taulukon karakteristisia leikkausvoimia  $V_{Rd}$  vastaavat konsolikoot. Tulokset näkyvät automaattisesti Tekla-mallissa sekä Rhinossa, kuten kuvassa 15 on esitetty.

### 5.3.5 Normaalivoimien sekä pilarikokojen määrittäminen

Pilarien normaalivoimat saadaan laskentaohjelmassa yksinkertaisesti summaamalla samoissa pisteissä vaikuttavat palkkien pääty pisteiden reaktiovoimat (kuva 18).



Kuva 18. Normaalivoimien tulokset Rhinossa. Voimat on kuvassa ilmoitettu pilarien ja palkkien pääty pisteissä. Palkit on nimetty kuvaan P-alkuisina tunnisteina. Laattojen tasokuormat on myös kuvassa ilmoitettu.

Normaalivoimia hyödynnetään pilarikokojen iteroinnissa. Tämän diplomityön laskentaohjelmaan on tuotu Paavo Vähäsen luoma pilarikokoiterointi-algoritmi. Se määrittää vaadittavat teräsbetonipilarikoot tämän diplomityön laskentaohjelman normaalivoimien tuloksien perusteella. Vähäsen pilaridimensiomäärittäminen perustuu kaavan (3) ehtoon, missä normaalivoiman mitoitusarvo ei saa ylittää rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvoa (Vähänen 2019, s. 19).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1, \quad (3)$$

missä  $N_{Ed}$  on tutkielman laskentaohjelmalla saatu normaalivoiman mitoitusarvo [kN] ja  $N_{Rd}$  on rakenneosan kestävyys puristuslujuuden mukaan [kN].

Kaavan (3) rakenneosan kestävyys saadaan yhtälön (4) avulla (Vähänen 2019, s. 19)

$$N_{Rd} = f_{cd} \cdot A_c, \quad (4)$$

missä  $f_{cd}$  on puristuslujuuden mitoitusarvo [kN/mm<sup>2</sup>] ja  $A_c$  on rakenneosan poikkipinta-ala [mm<sup>2</sup>].

Yhtälön (4) puristuslujuuden mitoitusarvo ratkaistaan kaavan (5) mukaan (Vähänen 2019, s. 19)

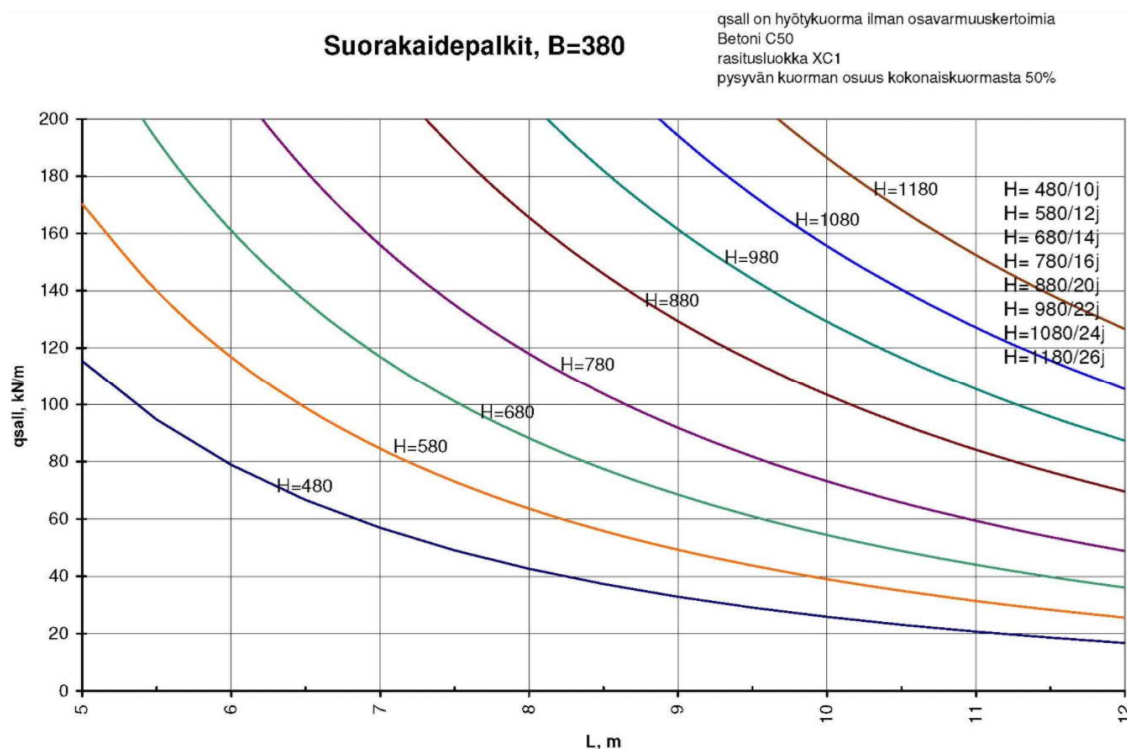
$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (5)$$

missä  $f_{ck}$  on betonin lieriölujuus [MPa] ja  $\gamma_c$  on betonin osavarmuusluku (normaalitilanteessa 1,5).

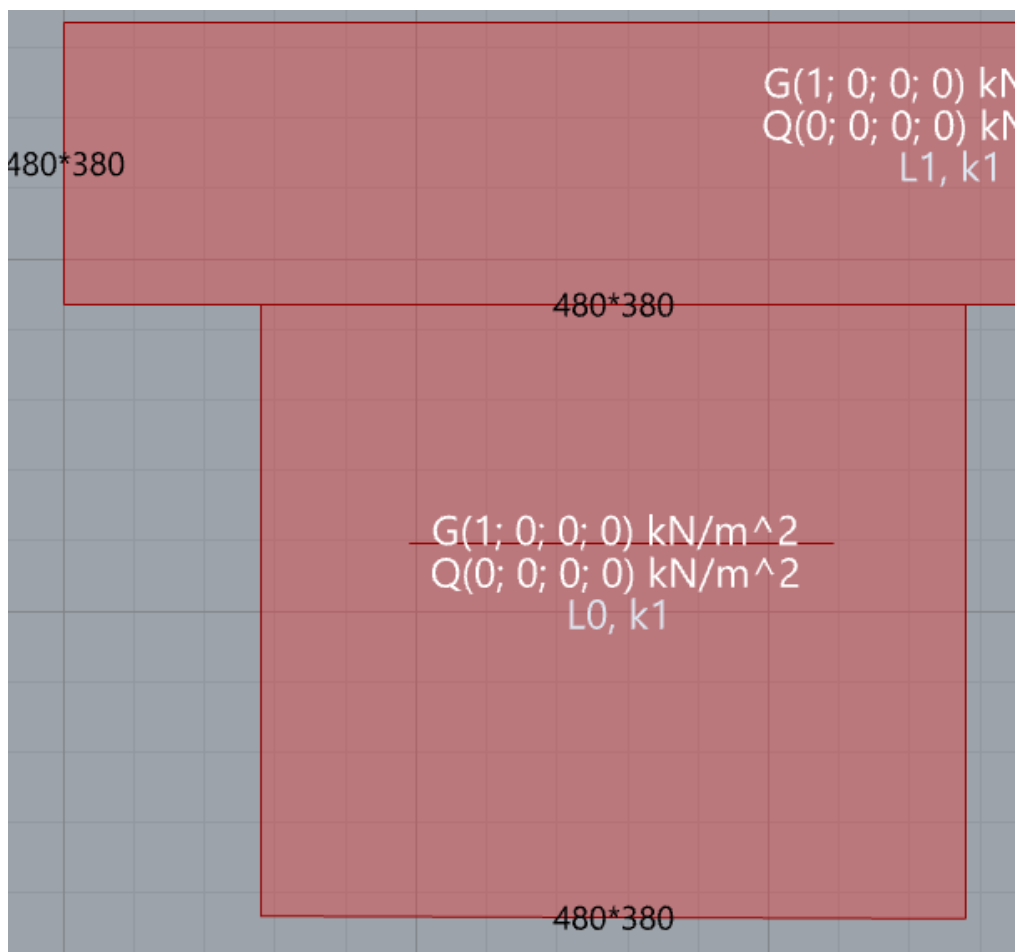
### 5.3.6 Palkkiprofiilien määrittäminen

Palkkiprofiilit määritetään palkkien pituuksien sekä maksimiviivakuormituksien suhteen vaadittavien minimidimensioiden perusteella. Profiilit iteroidaan taukukon 1 mukaisten kuvaajien avulla.

Taulukko 1. Jännitettyjen teräsbetonisuorakaidepalkkien mitoitusaulukko (Elementtisuunnittelu.fi, Jännitetyt suorakaidepalkit [verkkodokumentti]. Saatavissa <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/kantokykykayrat/jannitetyt-suorakaidepalkit> [viitattu 19.10.2020].). Palkkikokoja iteroidaan käyrien avulla laskentaohjelmalla laskettujen maksimiviivakuormien ja palkkipituuksien suhteissa. Jokaisesta tyypillisestä palkkileveydestä on olemassa omat erilliset mitoitusaulukot.



Ohjelma valitsee leukapalkkien koot jännitettyjen suorakaidepalkkitaulukoiden perusteella. Suorakaidepalkkitaulukoiden arvoja sovelletaan myös yleisesti leukapalkkikokojen iteroinnissa. Laskentaohjelmassa palkkien leveydet on rajattu mittoihin 380–480 mm ja korkeudet 480–880 mm. Rajaus kattaa kaikki tyypilliset rakennusten runkorakenteiden palkkikoot. 480 mm leveämpien palkkien käyttö tavanomaisissa rakenteissa on melko harvinaista, joten ne on oletettu ohjelman palkki-iteroinnissa tarpeettomiksi. Ohjelmaan on tehty kuitenkin varaus, jotta palkkiprofiili-iterointiin voidaan myös jälkeinpäin lisätä uusia palkkikokoja. Kuvassa 19 on kuvakaappaus Rhino-mallista, mille ohjelma on laskenut laattaa kantaville palkeille profiilikoot.



Kuva 19. Palkkikoko-iteroinnin tulokset Rhinossa. Palkkiprofiilit on kuvassa ilmoitettu palkkikenttien keskipisteissä.

Taulukon 1 mukainen maksimi mitoittava viivakuorma-arvo saadaan laskentaohjelmalla ilman varmuuskertoimilla lasketuista palkkien maksimimomenteista. Valintataulukoiden palkkikuvaajien sallitut viivakuorma-arvot on määritetty myös ilman varmuuskertoimia. Palkkikokojen valintataulukkomitoitusta varten lasketut maksimimomenttien arvot muutetaan tasaisiksi viivakuormiksi yhtälöllä (6). Palkkikokoiteroinnissa maksimiviivakuormat on laskettu ilman palkkien omien painojen vaikutuksia, kuten ne ovat taulukon 1 mukaisissa kuvaajissakin.

$$q = \frac{M \cdot 8}{L^2}, \quad (6)$$

missä  $q$  on palkin maksimiviivakuorma [kN/m],  
 $M$  on palkin maksimimomentti [kNm] ja  
 $L$  on palkin pituus [m].

Palkin maksimimomentista laskettu viivakuorma ei kuvaa todellista palkille muodostuvaa viivakuormakuvaajan muotoa, mutta sen tulos vastaa palkkiprofiilin taulukkoiteroinnin mitoittavaa maksimiviivakuorma-arvoa. Todellisen viivakuormakuvaajan määrittäminen ja vaiheet käsitellään kuormakuvaajan muodostaminen -luvussa.

### 5.3.7 Momenttikuvaajan muodostaminen

Laskentaohjelma muodostaa automaattisesti graafiset momenttikuvaajat mallin palkeille. Momentit lasketaan kuormituskertoimilla ja ilman kuormituskertoimia, jotta käyttäjällä olisi helpompi tarkistaa sekä verrata laskennan tuloksia. Momenttikuvaajien graafisissa esityksissä on ilmoitettu maksimimomenttien arvot ja paikat. Ohjelma laskee momenttikuvaajat palkkikenttiin kantautuvien pistekuormien suuruuksien sekä sijaintien perusteella.

Jokaisesta palkille kantautuvasta pistevoimasta lasketaan nivelisesti päistään tuetun palkin kentälle yksinkertaiset momenttikuvaajat. Jokaisen yksittäisen pistevoiman maksimimomentin arvo lasketaan kaavasta (7). Maksimimomentti määrätään pistevoiman vaikutuspisteeseen.

$$M = \frac{P \cdot a \cdot b}{L}, \quad (7)$$

missä  $M$  on palkille yksittäisestä pistevoimasta muodostuva maksimimomentti [kNm],

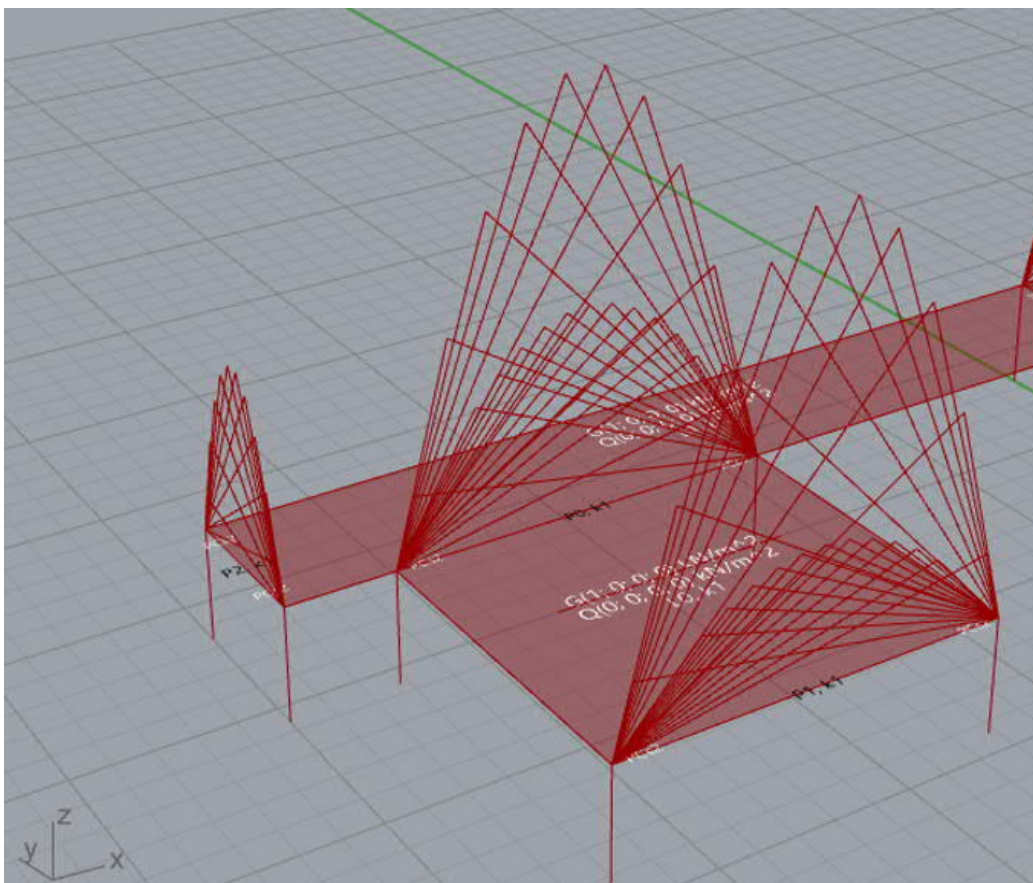
$P$  on palkin kentässä vaikuttava yksittäinen pistevoima [kN],

$a$  on etäisyys palkin alkupisteestä pistevoiman vaikutuspisteeseen [m]

$b$  on etäisyys palkin loppupisteestä pistevoiman vaikutuspisteeseen [m] ja

$L$  on palkin pituus [m].

Kuvassa 20 jokaisesta pistekuormasta on muodostettu kaavan (5) mukaisesti suuruuksien ja sijaintien perusteella palkeilla vaikuttavat yksinkertaiset momenttikuvaajat.



Kuva 20. Palkeille yksittäisistä pistevoimista muodostetut momenttikuvaajat. L0-laatta sijaitsee kuvan keskellä. Kuvan L0-laatan kantavilla palkeilla voi havaita laatalta sekä ei-kantavalta väliseinältä muodostetut pistevoimien momenttikuvaajat. Palkkien omien painojen momenttikuvaajat on kuvasta piilotettu.

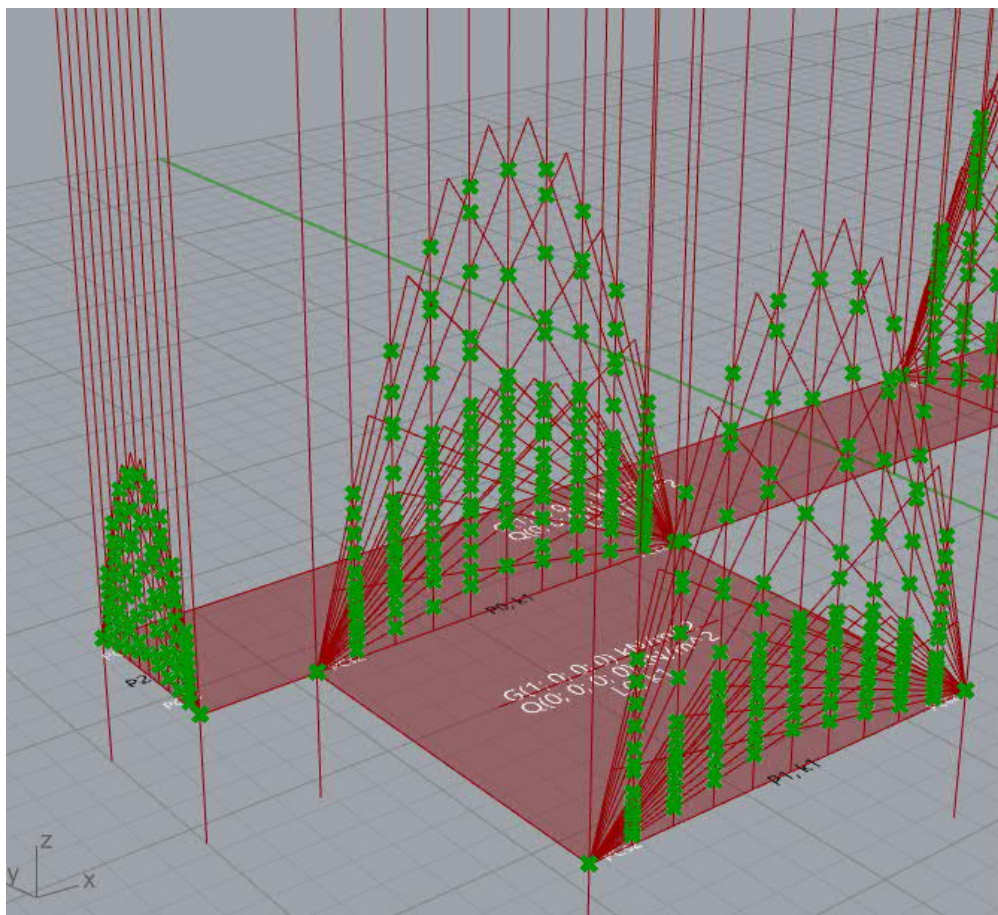
Momenttikuvaajat ovat tässä vaiheessa laskentaa erillisiä, toisistaan riippumattomia ja palkin todelliseen momenttikuvaajan muodostamiseen vaikuttavia tekijöitä. Kukin kuvassa 20 esiintyvä momenttikuvaaja sisältää geometriatiedot siitä, kuinka suuria yksittäisistä pistevoimista aiheutuvia momenteja esiintyy palkkikenttien pisteissä. Kuvasta 20 nähdään myös L0-laatan keskeltä olevasta ei-kantavasta väliseinästä palkeille kantautuvien pistevoimien (kts. kuva 14) momenttikuvaajat. Väliseinistä aiheutuvat pistevoimamomentit havaitaan kuvan palkeilla tasokuormista muodostettujen pistekuormien momenttikuvaajiin verrattuna pienempinä momenttikuvaajina. Ei-kantavat väliseinät on kuvasta näkymäasetuksilla piilotettu.

Jokainen yksittäisestä pistevoimasta palkille muodostettu momenttikuvaaja on itsenäinen, eikä niille vielä tässä vaiheessa laskentaa ole asetettu toisistaan riippuvia kytköksiä. Muodostaessa todellista palkin momenttikuvaajaa, ohjelma jakaa palkit osiin käyttäjän määrittämän arvon mukaan. Ohjelma muodostaa jokaisesta palkin jakopisteestä äärettömän pitkät z-akselin suuntaiset viivat. Jokaisesta jakopisteen viivasta ohjelma löytää kohdan, missä se leikkaa kunkin yksittäisen palkille muodostetun pistekuorman



momenttikuvaajan. Jokaisen momenttikuvaajan geometria leikkaa palkin jakoviivan vain kerran. Palkkitasojen z-koordinaattiarvot asetetaan laskennassa nollatasoiksi. Nollatasoon suhteutetuiden leikkauspisteiden z-koordinaattien arvot (äärettömän pitkä jakoviiva leikkaa momenttikuvaajat) vastaavat yksittäisiä pistekuormien momentteja kyseisessä palkkikentän jakopisteessä.

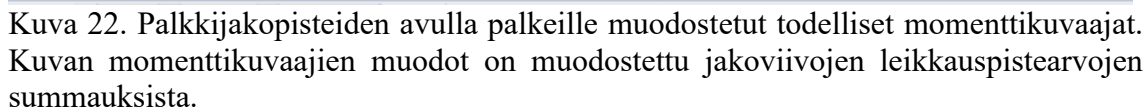
Kuvassa 21 on havainnollistettu, kuinka palkkijako on ohjelmassa toteutettu ja miten äärettömän pitkät jakoviivat leikkaavat yksittäisistä pistevoimista muodostettuja momenttikuvaajia. Kuvan 21 vihreät pisteet ovat jakoviivojen sekä momenttikuvaajien leikkauspisteitä. Tämän laskennan välivaiheen näkymä on oletetusti Rhinossa ja Teklassa piilotettu, jotta se ei aiheuttaisi sekaannusta lopullisissa todellisissa momenttikuvaajien tuloksissa.



Kuva 21. Palkkien jakopisteiden jakoviivojen ja momenttikuvaajien leikkauspisteet. Leikkauspisteet on kuvassa havainnollistettu vihreällä värillä.

Seuraavaksi jokaisessa palkin jakopisteissä jakoviivojen momenttikuvaajien leikkauspisteiden (momentit) arvot lasketaan yhteen. Saatu tulos on palkin jakopisteessä vaikuttava todellinen momenttiarvo. Kuva 22 esittää kuinka todellinen momenttikuvaaja

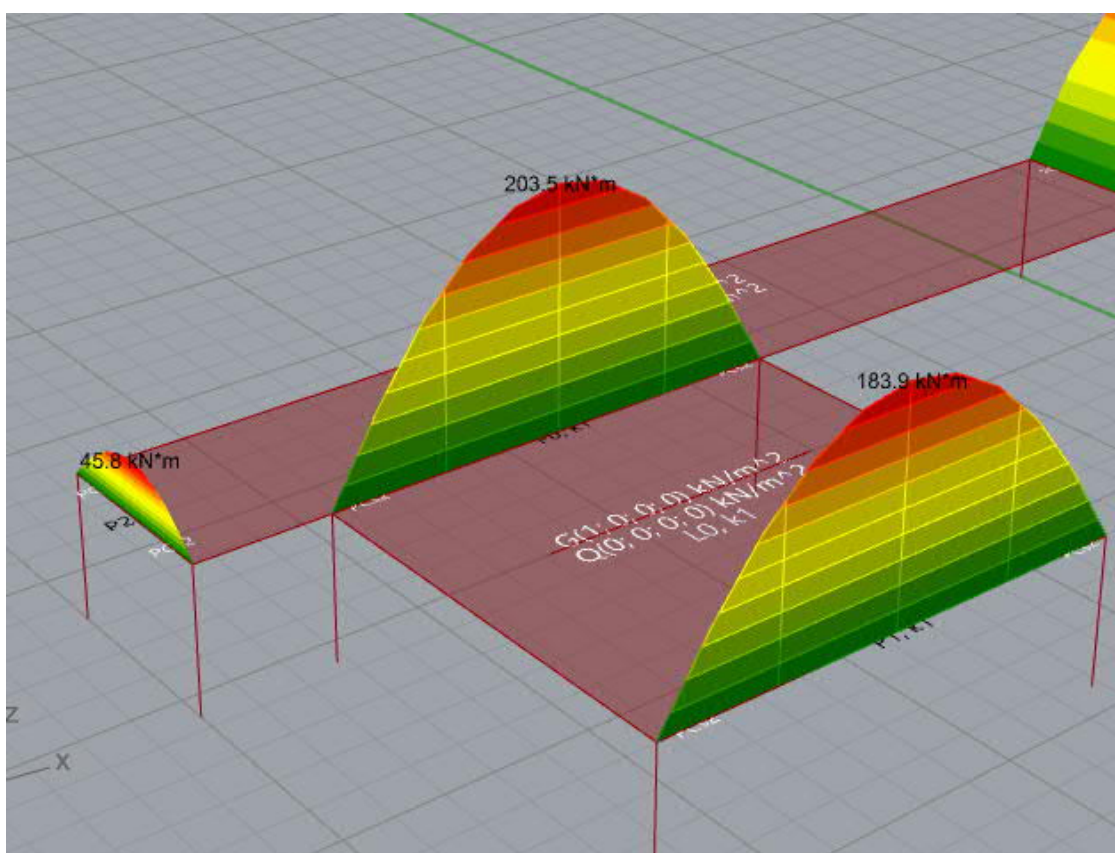




Kuvan 22 mukaiset momenttikäyrät on muodostettu palkkijaon arvolla kymmenen. Tämä tarkoittaa, että kukin palkki on jaettu ohjelmassa yhteentoista jakopisteeseen (0,1,2...10) ja niihin muodostettaviin jakoviivoihin. Tavallisten yksinkertaisten tapausten, esimerkiksi suorakulmaista laattaa päistään kantavien palkkien momenttikuvaajien, tulokset eivät muutu ollenkaan tai hyvin vähän suuremmalla jaon arvolla kuin kymmenen.

Jos laatalta on ei-kantavia väliseiniä, arvon kasvattaminen voi tarkentaa tuloksia. Kun arvoksi vaihdetaan esimerkiksi kaksi, momenttikuvaajat muodostuvat harvasti kolmella jakopisteellä (0,1,2). Tulokset eivät enää välttämättä ole luotettavia. Muodostuneet momenttikuvaajat ovat myös graafisilta esityksiltään kulmikkaita.

Lopulliset palkkien momenttikuvaajien graafiset esitykset ovat kuvan 23 mukaisia. Ohjelma laskee maksimimomentin arvon ja ilmoittaa kuvaajassa sen tarkan sijainnin. Momenttiarvojen suuruuksia on havainnollistettu Rhinossa väreillä sekä käyttöliittymän näkymäasetuksissa on mahdollisuus skaalata momenttikuvaajien kokoja. Kuvasta 23 on piilotettu väliseinien näkymät.



Kuva 23. Momenttilaskennan tulokset Rhinossa. Kuvan momenttikuvaajista on etsitty huippupisteet, joissa esitetään palkkien maksimimomenttiarvot. Tuloksien värivisualisointi pystytään Rhinossa helposti toteuttamaan. Useissa muissa Grasshopper-yhteensopivissa ohjelmissa (esimerkiksi Telkassa) värivisualisointia ei voida tehdä.

Ohjelmaan haluttiin kehittää yksi selkeä menetelmä, mikä laskee luotettavasti yksittäisistä pistekuormista palkkien momentit riippumatta, missä muodossa kuormitukset on mallin rakenneosille määrätty. On hyvin tavallista, että ei-kantavien väliseinien ollessa laattojen kantosuuntaisia, palkeille muodostuu suuria yksittäisiä pistevoimia. Kun kaikki palkille vaikuttavat kuormitukset on erittelemättömästi

ilmoitettu pistevoimina, ei yksittäisille kuormitustekijöille tarvitse ohjelman sisäisesti määrätä erillisiä laskentatoimenpiteitä.

Kun kaikki kuormat ovat samassa muodossa, niitä operoidakseen tarvitsee ohjelman momenttilaskennassa muodostaa yksi tai yksittäisiä samaan käytäntöön pohjautuvia algoritmisia laskureita. Jos momenttikuvaajia lasketaan usealla eriävillä momenttilaskennan laskureilla, voi olla vaarana, että laskentaohjelman tietokokonaisuus monimutkaistuu liikaa. Se voi hankaloittaa ohjelman rakentamista ja saattaisi vahingossa johtaa virheellisiin laskentaprosesseihin.

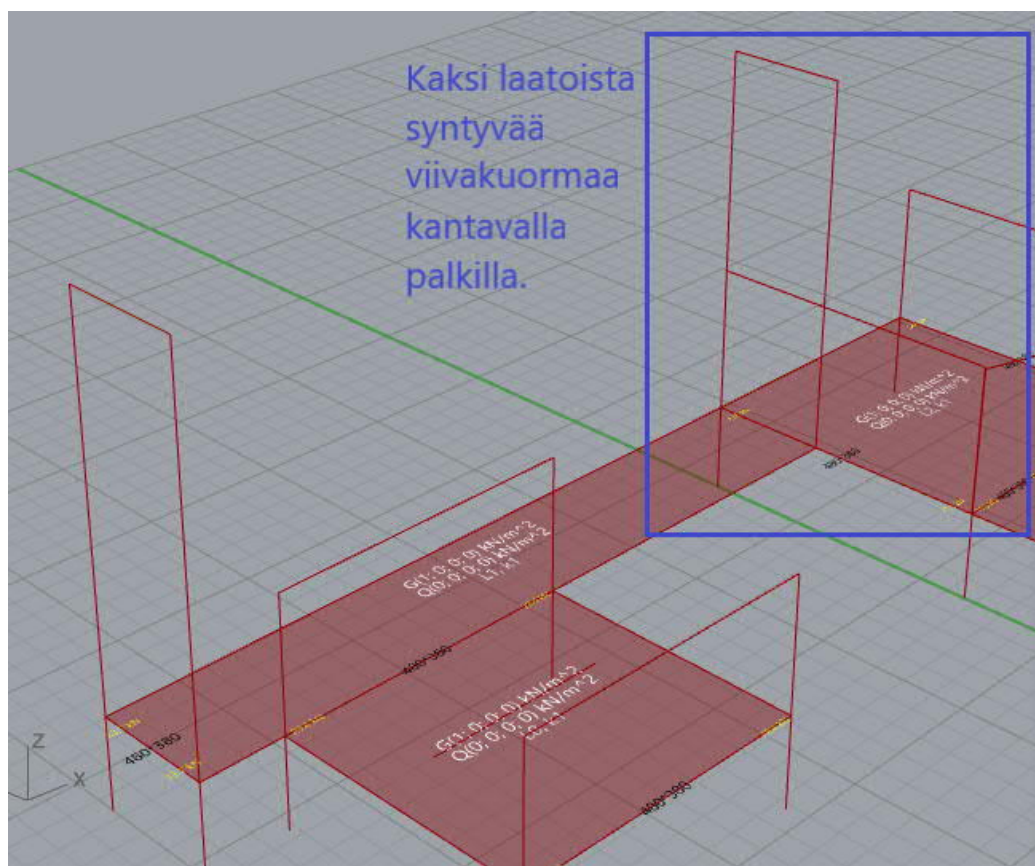
Erillisillä momenttilaskennan laskureilla tarkoitetaan tässä tapauksessa niitä algoritmeja, joilla lasketaan toisistaan poikkeavaa momenttilaskennan tietomuotoa keskenään. Tulokset täytyy lopuksi yhdistää yhdeksi samaa tietomuotoa sisältäväksi kokonaisuudeksi. Erillistä tietomuotoa sisältävät tekijät voivat olla esimerkiksi pistekuormasta, tasaisesta viivakuormasta, epätasaisesta viivakuormasta tai tasokuormasta palkeille muodostetut erilliset momenttikuvaajat. Ne on mahdollisesti laskettu samalle palkille eriävillä momenttilaskennan algoritmeilla. Erimuotoista dataa sisältävien momenttikuvaajien yhteensovittaminen todettiin diplomityön laskentaohjelman kehityksessä kömpelöksi ja epäloogiseksi. Siispä jokaiselle palkille kantautuvan kuormituksen tyypiksi valittiin yhdenmukaisesti pistekuorma, mikä palveli momenttilaskennan lisäksi reaktivoimien, pilarivoimien sekä kuormakuvaajien loogista laskentaa.

### 5.3.8 Kuormakuvaajan muodostaminen

Palkkien kuormakuvaajat muodostetaan momenttikuvaajalaskennan tavoin palkkijakomenetelmällä. Palkkijako määräytyy samalla käyttäjän asettamalla arvolla, mikä on määrätty momenttikuvaajalaskentaankin. Jokaisesta palkin jakopisteistä muodostetaan momenttilaskennan tavoin äärettömän pitkät z-akselin suuntaiset jakoviivat.

Kuormakuvaajan muodostamisessa lasketaan ensin yksittäisen laatan nurkkapisteisiin reaktivoimat, mitkä ne kohdistuvat palkkien kenttiin tai päätypisteisiin. Seuraavaksi pisteisiin muodostetaan reaktivoimien mukaiset kuormavektorit, joista määrätään niiden suuruuksia vastaavat viivakuormat. Viivakuorma lasketaan laatan nurkkapisteiden reaktivoimasta jakamalla arvot pituudella, millä matkalla laatan kantava pääty palkilla

vaikuttaa. Viivakuorma-arvoista muodostetaan palkeille kuormitusvektorit, mitkä yhdistellään viivoin päätepisteidensä kautta. Tuloksena syntyy erillisiä palkilla vaikuttavia viivakuormakuvaajien geometrioita. Kuvan 24 sinisellä laatikoitu alue havainnollistaa, kuinka palkilla kannateltavien laattojen nurkkapisteiden reaktiovoimista on muodostettu yksittäiset viivakuormageometrit.

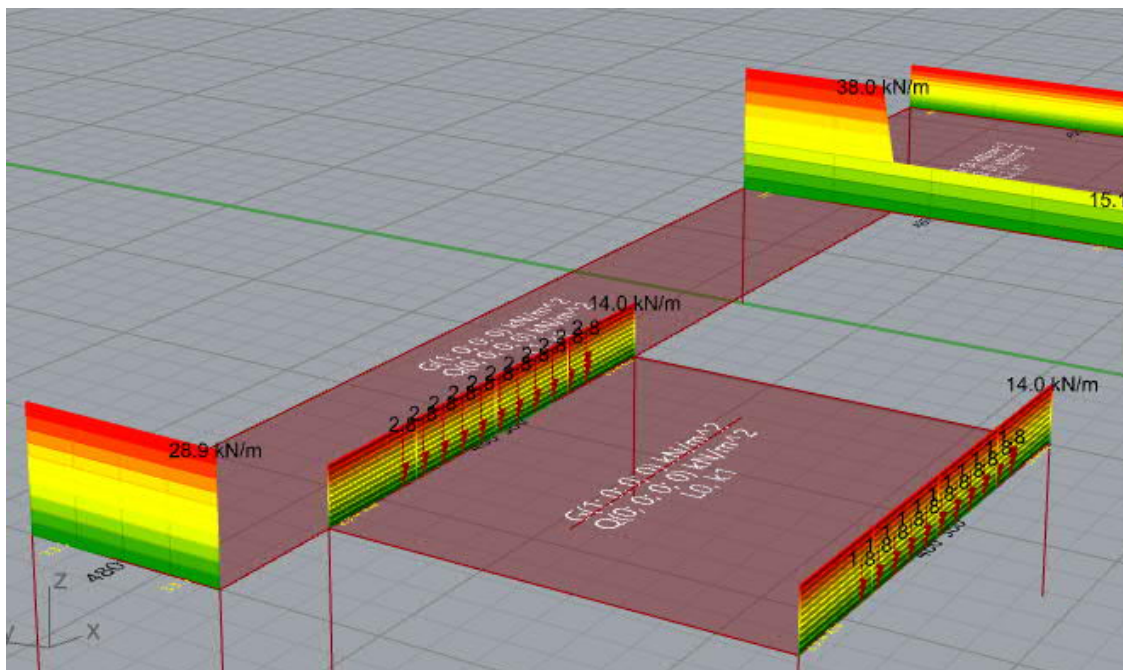


Kuva 24. Palkeille yksittäisiltä laatoilta muodostetut viivakuormien kuvaajat.

Kuten momenttilaskennassakin, määritetyt viivakuormageometrit ovat itsenäisiä, jokaisen laatan vaikutusalueelta palkeille muodostuvia yksittäisiä kuvaajia. Seuraavaksi palkit jaetaan käyttöjärjestelmässä momenttilaskennan tavoin osiin ja äärettömän pitkiin jakoviivoihin. Muodostetut jakoviivat leikkaavat palkkikohtaisesti kuvaajien geometriat ja leikkauspisteiden (viivakuormat) arvot summataan palkin jakopisteissä. Näin saadaan laskettua palkeille todelliset jakopisteissä vaikuttavat viivakuorma-arvot.

Jakopisteiden määrillä on myös vaikutusta viivakuormakuvaajien esitystarkkuuteen. Liian harvalla jaolla viivakuormien vaikutusalojen pituudet eivät välttämättä selvärajaisesti piirry kuvaajien tuloksiin. Voi olla myös mahdollista, että harva jakoviivoitus ei löydä lyhyellä matkalla palkkikentässä vaikuttavia viivakuormahuippuja. Tilanne korjaantuu, kun palkkijakoa tihennetään. Kuvassa 25 on esitetty, miltä Rhino-

ikkunassa kuormakuvaajat lopullisesti näyttävät. Kuormakuvaajat sisältävät momenttikuvaajien tavoin maksimi-arvot sekä niiden sijainnit. Kuormakuvaajia voi momenttikuvaajien tapaan käyttöliittymässä skaalata.



Kuva 25. Kuormakuvaajalaskennan tulokset Rhinossa. Kuvan viivakuormakuvaajista on etsitty huippupisteet, joissa esitetään palkkien maksimiviivakuorma-arvot. Kuvan etureunan L0-laataalla sijaitsevasta tiiliväliseinästä (näkymä piilotettu) on muodostettu palkeille pistevoimavektorit.

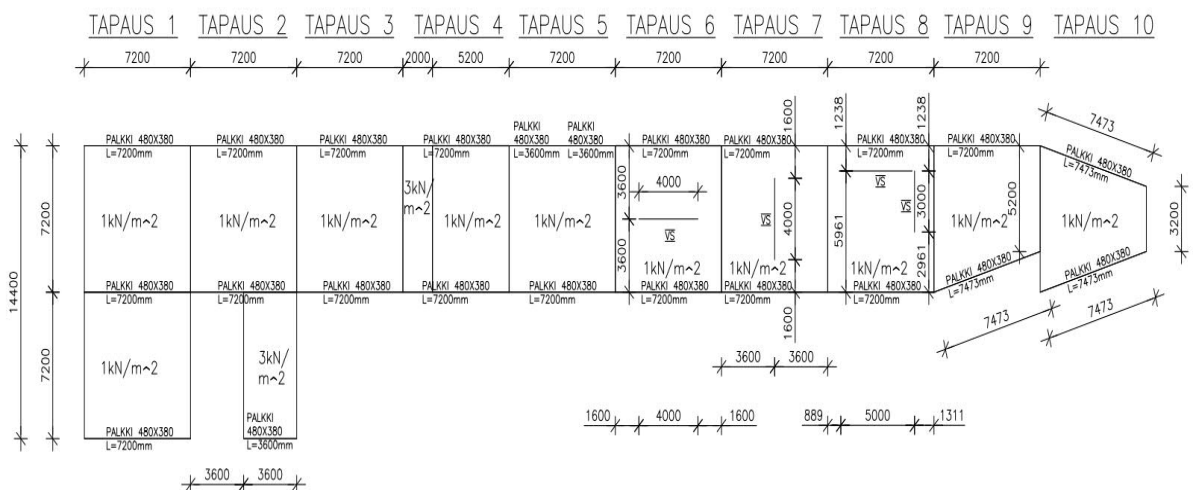
Kuvassa 25 on esitetty palkeille syntyvien laattojen tasokuormien ja palkkien omien painojen viivakuormituslaskelmien yhteisvaikutustulokset. Ei-kantavista väliseinistä kantautuvat kuormat ilmoitetaan tuloksissa pistevoimina. Se johtuu siitä, että väliseinät voivat sijaita laattakentissä sattumanvaraisesti. Palkeille voi muodostua väliseinien sijaintien perusteella tasaisia viivakuormia, epätasaisia viivakuormia tai pistemäisiä kuormia. Laskennan sekä ohjelmoinnin yksinkertaistamiseksi päätettiin väliseinien kuormitustuloksien visuaalisointi vakiinnuttaa pistekuormiksi. Ei-kantavien väliseinäpistekuormien visuaalinen jako määräytyy käyttöjärjestelmässä asetetun verkotusarvon perusteella. Pistevoimien graafista esitystä on laskentaohjelmassa rajoitettu, ettei suurella verkotusarvolla laskettaessa väliseinien pistekuormajoukoista tulisi liian tiheitä, jolloin tuloksia olisi mallista vaikea lukea.



## 6 TULOKSIEN TARKASTELU

Diplomityössä tutkittiin laskentaohjelmalla saatuja tuloksia sekä niiden luotettavuutta. Sitä varten AutoCADilla luotiin yksinkertainen dwg-kerrospohja, missä oli yhdistelty useita tyypillisiä staattisesti määrättyjä palkki-laattatapauksia. Dwg-tiedosto luettiin laskentaohjelmaan, jossa laatoille määrättiin yksinkertaiset tasokuormat. Ohjelma laski tulokset hetkessä.

Laatoille määrättiin tasokuormiksi  $1 \text{ kN/m}^2$  sekä  $3 \text{ kN/m}^2$ . Tarkoituksena oli määrätä laatoille samanlaisia selkeitä tasokuormia, jotta eri laskentamenetelmien tuloksien vertailu olisi yksinkertaista. Tulokset on laskettu ilman kuormitusyhdistelmiä, minkä tarkoituksena on myös yksinkertaistaa vertailua. AutoCADilla luotu dwg-kerrospohja on esitetty kuvassa 26. Kuvaan on lisätty laattojen mittoja, ei-kantavien väliseinien paikat, palkkien dimensioid sekä laattojen tasokuormien arvot.



Kuva 26. Koe- ja vertailulaskennan tuloksien tarkastelua varten luotu dwg-kerrospohja. Palkki-laattatapaukset on kuvan vaakasuunnassa nimetty. Tapaukset on myös erikseen havainnollistettu liitteen 2 käsinlaskennassa (tapausesitykset).

Laskentaan määrättiin  $480 \times 380 \text{ mm}$  teräsbetonipalkit. Laattojen omapainoja ei varsinaisesti ole laskennassa otettu huomioon, vaan käyttöjärjestelmässä on määrätty kuvassa 26 esitetyt pelkistetyt tasokuormat, mitkä määrittävät kokonaiskuormitukset koko laatta-aloille. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka luotettavasti ohjelmassa sovelletut laskentamenetelmät automatisoidusti toimivat tasokuormatapauksissa. Laskentaan on valittu 10 erilaista palkki-laattatapauksia, joiden muuttuvien geometrioiden ja kuormitusten vaikutuksia haluttiin diplomityön laskentaohjelman tuloksissa tutkia.

Kaikki kuvan 26 kerrospohjan tapauksien laatat ovat yhteen suuntaan kantavia ontelolaattoja.

## 6.1 Tuloksien vertailuun luotu kerrospohja

Kerrostason palkki-laattatapauksissa 1–2 haluttiin tutkia ohjelman laskentamenetelmien käyttökelpoisuutta, kun suorakulmaisten laattojen päitä kantaa sama palkki. Tapauksessa 1 palkki on laattojen levyinen ja tapauksessa 2 vastakkaisesta laatasta kantautuu kuormia puolen palkin pituudelle. Tapauksessa 3 analysoidaan yksinkertaista palkki-laattatapausta, jossa palkeille ei liity muita laattoja.

Tapauksissa 4 palkeille kantautuu kuormia kahdelta erisuuruisilta laatoilta, joille on määrätty eriävät tasokuormat. Pienemmälle laatalle määrättiin  $3 \text{ kN/m}^2$  ja suuremmalle  $1 \text{ kN/m}^2$ . Tässä tapauksessa laattojen tasokuormat eivät jakaudu täysin puolittain palkkikentille. Tapauksessa 5 laatan toista päätyä kantaa puolittain kaksi yhtä pitkää palkkia.

Kerrostason palkki-laattatapauksissa 6–8, laattojen kentissä esiintyy ei-kantavia väliseiniä. Tapauksessa 6 laatalle sijaitsee keskeinen, kantosuuntasuhteessa poikittainen, väliseinä. Tapauksessa 7 laatalle on keskeinen kantosuunnan suuntainen väliseinä. Tapauksissa 6 ja 7 haluttiin tutkia, kuinka ohjelma huomioi tasaisesti palkeille levittäytyvien väliseinäpistekuormien (tapaus 6) sekä suurten yksittäisten väliseinäpistekuormien (tapaus 7) vaikutukset. Tapauksessa 8 ei-kantavat väliseinät on sijoitettu laattakenttiin mielivaltaisesti.

Tapauksissa 9 ja 10 tutkitaan epäsymmetristen laattojen vaikutuksia ohjelman laskentamenetelmissä. Tapauksessa 9 laatta on toisesta päästään viisteinen ja tapauksessa 10 viisteet ovat molempien puoleisia. Molempien laattojen päitä kannatellaan yksillä betonipalkeilla.

## 6.2 Tuloksien vertailu eri laskentamenetelmillä

Diplomityölle luodun Grasshopper-laskentaohjelman tuloksia verrattiin käsin- sekä FEM-laskennan tuloksiin. Käsinlaskennan laskutoimitukset ja tulokset löytää tämän tutkielman liitteistä (Liite 2. Palkki-laattatapauksien käsinlaskenta). FEM-ohjelmana

käytettiin kolmiulotteiseen elementtimenetelmään perustuvaa Virtual Systems Jigi-ohjelmaa. Jokainen esitetyn dwg-kerrostason palkki tarkasteltiin Jigissä erikseen, koska ohjelmalla ei pysty mallintamaan kantavia laattoja. Laattojen kentistä palkeille kantautuvat viivakuormat sekä ei-kantavilta väliseinien pistekuormat laskettiin ensin käsin, joista ne syötettiin Jigi-mallin palkeille.

Kuten aiemmin mainittuna, ei-kantavien väliseinien kuormat muutettiin laskentaohjelmassa viivakuormaesityksen sijasta väliseinien pituuksiin suhteutetuiksi tasaisiksi jakautuviksi pistekuormiksi. Eri kuormitustekijöistä palkeille kantautuvien kuormien esitystavat haluttiin laskentaohjelmassa vakiinnuttaa. Vertailulaskennassa haluttiin myös pitäytyä laskentaohjelman palkkikuormien esitystavoissa. Tästä syystä tapausten 6–8 käsin- ja FEM-laskennan tulokset on muodostettu ei-kantavien väliseinien pistekuormien vaikutuksista. Väliseinäkuormitusten vaikutukset määrättiin vertailulaskelmissa pistekuormina kuten ne ovat laskentaohjelmassakin, koska tuloksia on tällä tavalla helpompi taulukkolistatusti verrata (kts. Liite 1).

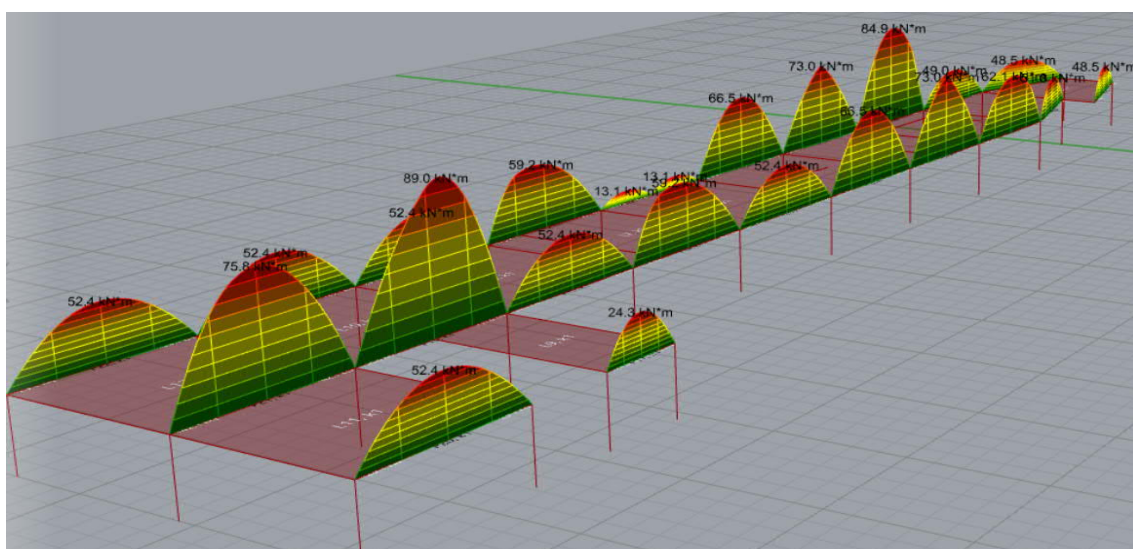
Laskentaohjelman, käsinlaskennan ja elementtimenetelmä-laskennan tuloksia verrataan tämän tutkielman liitteen 1 taulukoissa (Liite 1. Palkki-laattatapauksien tuloksien vertailutaulukot). Liitteessä tulokset on jaettu kolmeen kategoriaan: palkin maksimimomentti, palkin maksimiviivakuorma sekä reaktivoimat. Tapauksissa, joissa laatoilla sijaitsee ei-kantavia väliseiniä, ilmoitetaan väliseistä aiheutuvat pistekuormat taulukon 1 maksimiviivakuorma ja väliseinien pistevoima -rivillä. Taulukoissa on neljä saraketta. Ensimmäiseen sarakkeeseen on kirjattu laskentaohjelmalla saadut tulokset. Toisessa sarakkeessa on vastaavat käsinlaskennan tulokset ja kolmannessa Jigin elementtimenetelmä-laskennan tulokset. Viimeisessä sarakkeessa ilmoitetaan kuinka monta prosenttia laskentaohjelman tulokset poikkeavat käsinlaskennan (K) ja elementtimenetelmä-laskennan (J) tuloksista. Liitteen 1 viimeinen taulukko vertaa laskentaohjelman tuloksia käsin- sekä elementtimenetelmä-laskennan tuloksiin ilmoittamalla niiden väliset keskiarvoiset suhteet.

### **6.2.1 Momenttikuvaajien tuloksien vertailu**

Laskentaohjelman maksimimomenttien tulokset poikkesivat käsin- ja FEM-laskennasta keskimäärin 0,6 prosenttia. Osassa tapauksessa palkkien kokonaismomentti oli käsinlaskennassa laskettu palkin keskelle, vaikkei maksimimomentin todellinen sijainti ole täsmälleen siinä kohdassa. Tällainen tilanne on esimerkiksi tapauksessa kaksi. Käsin

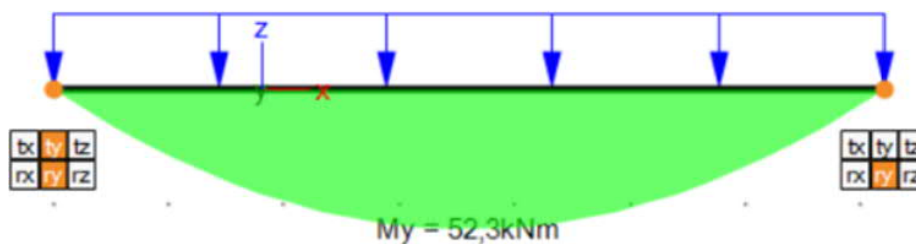


laskettuna palkin keskelle saatiin maksimimomentin arvoksi 87,3 kNm, kun se Jigillä on 89,8 kNm. Tuloksesta voidaan kuitenkin olettaa, että maksimimomentin suuruus vastaa kuta kuinkin palkin kentän keskeistä momenttia. Laskentaohjelmalla saatiin suhteellisen harvalla verkotuksella (10x10) vastaavaksi tulokseksi 90,2 kNm. Tulos tarkentui hieman kohti FEMin arvoja, kun verkotusta tihennettiin. Lähes kaikki laskentaohjelman tulokset on määrätty liitteen 1 taulukossa samalla 10x10 verkotuksella. Taulukoihin on erikseen ilmoitettu, jos verkotusta on laskennassa tihennetty. Tapauksessa neljä, jossa kaksi laattaa liittyy samalle palkille, tiheämpi verkotus (20x20) tarkensi tuloksia. Kuvan 27 laskentaohjelman momenttilaskennan tulokset on kuvakaapattu Rhino-ikkunasta. Kuvasta nähdään momenttikuvaajien lisäksi palkkien maksimimomenttiarvot sekä niiden sijainnit.



Kuva 27. Testikerrospohjan momenttilaskennan tulokset Rhinossa. Tulokset vastasivat todellisuutta ja kuvaajat olivat FEM-laskennan mukaisia.

Maksimimomenttien vertailulaskelmien tulokset poikkesivat hyvin vähän laskentaohjelman tuloksista. Esimerkiksi tapauksessa viisi, puolittain laattareunaa kannattelevien palkkien maksimimomenttien FEM-tulokset eivät poikenneet ollenkaan laskentaohjelmasta. Saman laatan pitemmällä palkilla poikkeama oli vain 0,2%. Tapauksessa 1 käsinlaskennan sekä FEMin momenttitulokset poikkesivat laskentaohjelman tuloksista 0,2%. Kuvassa 28 on esitetty Jigin momenttilaskennan tulos tapauksen 1 päätypalkeille.



Kuva 28. Jigi-ohjelmalla saatu tapauksen 1 päätypalkin maksimimomentin tulos. Kuormat määrättiin Jigi-malliin käsinlaskennasta. Jokainen palkki analysoitiin Jigissä erikseen.

Pienet poikkeamat maksimimomenttien tuloksissa johtuvat pääasiassa pyöristyksistä vertailulaskelmien viivakuormien laskenta-arvoissa sekä tuloksissa. FEM-tuloksien epätarkkuuksiin voi vaikuttaa muun muassa solmupisteiden määrät, materiaalmallit, kinemaattiset oletukset sekä reunaehdot. Laskentaohjelman tulokset pyöristetään yhden desimaalin tarkkuudella, mikä voi myös aiheuttaa pieniä vertailulaskelmiin suhteutettuja poikkeamia.

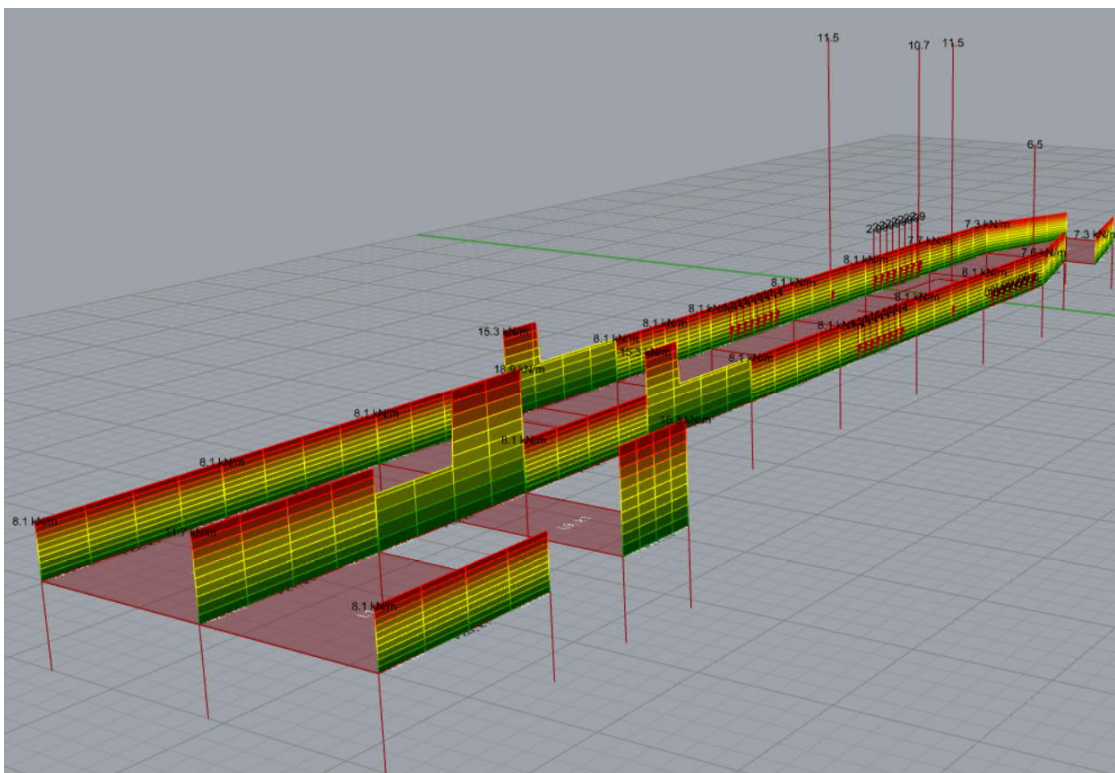
Kokonaisuudessaan maksimimomenttien tuloksien poikkeamat vaihtelivat vähän, yleisesti 0–0,8 prosentin välillä. Lisäksi laskentaohjelman momenttikuvaajat vastasivat Jigin muodostamia kuvaajia. Tapauksissa 9 ja 10 momenttipoikkeamat olivat suurimmillaan 1,8%. Syynä siihen on, että käsin- ja FEM-laskennassa oli käytetty laatoilta palkeille laskettuja viivakuormien approksimaatioita. Epäsymmetristä laatoista on siis määritelty vertailulaskelmiin viivakuormat liitteen 2 mukaan (tapaukset 9 ja 10). Siinä laatta on jaettu tasaisiin vyöhykkeisiin, joista palkeille määrätään viivakuormien arvot vyöhykkeiden määräämille leveyksille. Saatu kokonaisviivakuormakuvaajan muoto on porrastunut ja eikä täysin tarkka. Tästä syystä vertailumenetelmien tulokset poikkeavat hieman laskentaohjelman tuloksista. Epätäsmällisen viivakuorma-approksimaatiomäärityksen takia voidaan otaksua, että laskentaohjelma laskee näissä tapauksissa tarkemmat maksimimomenttiarvot.

### 6.2.2 Kuormakuvaajien tuloksien vertailu

Kuormakuvaajien vertailu käytiin pelkästään laskentaohjelman ja käsinlaskennan välillä. Jigillä analysoitiin siis vain jokaisen palkki-laattatapauksen palkkimomenttikuvaajat ja reaktiivoimat, joiden muodostamiseen vaikuttavat kuormitukset määrättiin käsinlaskennan kautta.

Kuormituslaskennan tulokset poikkesivat käsinlaskennasta keskimäärin 0,2 prosenttia. Tulokset olivat identtisiä 1–8 tapauksissa. Ainoastaan tapauksissa 9 ja 10, joissa laattojen geometriat olivat epäsymmetrisiä, tuloksien poikkeamia voitiin havaita. Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, epäsymmetristen laattojen palkeille muodostettiin käsinlaskennalla viivakuorma-approksimaatiot. Laskennassa laatat jaettiin neljään tasalevyiseen sarakkeeseen. Palkkikenttään muodostui näin ollen porrastetusti muuttuvia sarakkeiden levyisiä tasaisesti jakautuneita viivakuormia. Liitteen 1 taulukon tapauksissa 9 ja 10 laskentaohjelman tuloksia verrataan porrastetusti muuttuvista viivakuormista laskettuun keskiarvoon.

Tapauksien 9 ja 10 palkeille määrättiin tasaisia viivakuormia, koska laattojen jakosarakkeet on laskennan nopeuttamiseksi määrätty suorakaiteisiksi. Todellisuudessa tapauksien 9 ja 10 laattoja vinosti leikkaavilla palkeilla viivakuormat ovat muuttuvia. Viivakuormien arvot pienenevät tasaisesti, mitä lähemmäs laatan kapenevaa päätyä palkilla edetään. Laskentaohjelma laskee tällaisissa tapauksissa viivakuormien arvot muuttuvina kuormina. Kuva 29 on kuvakaappaus Rhino-ikkunasta, laskentaohjelman kuormituskuvaajien tuloksista.



Kuva 29. Testikerrospohjan kuormituskuvaajalaskennan tulokset Rhinossa. Tulokset vastasivat todellisuutta ja kuvaajat olivat käsinlaskennan mukaisia.

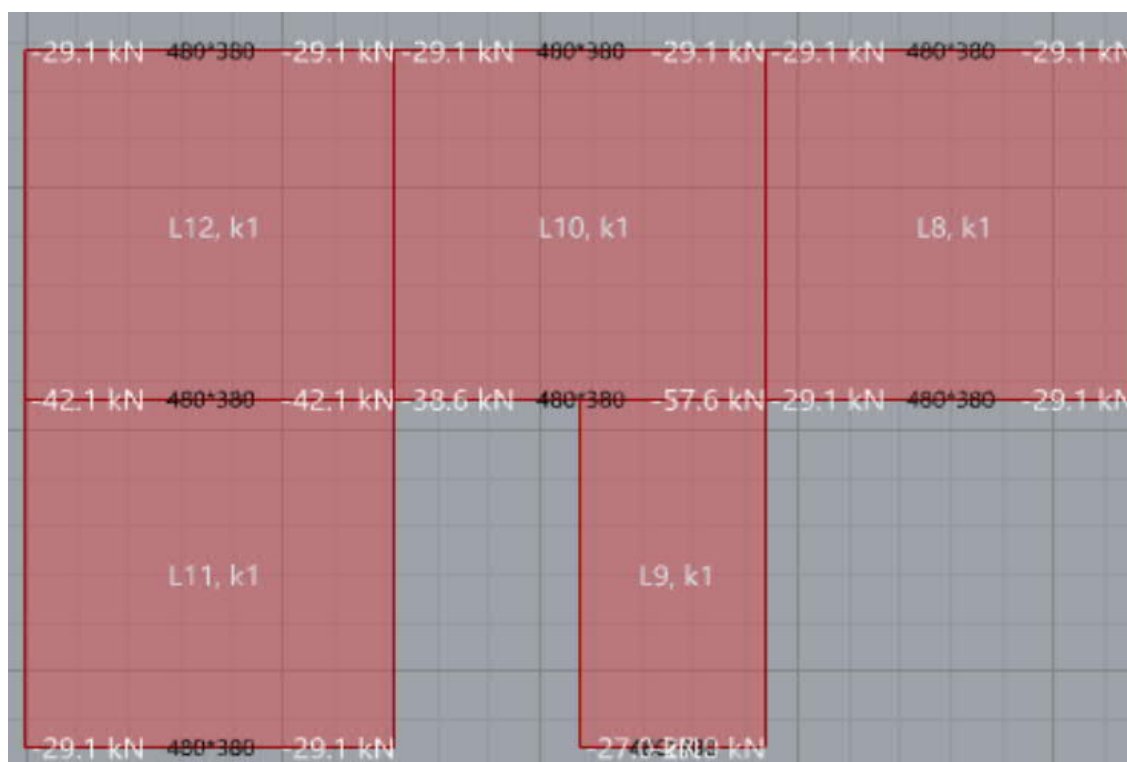
Liitteen 1 tulostaulukossa, viivakuorma-arvot poikkeavat suurimmillaan laskentaohjelman tuloksista tapauksessa 9 (1,2 prosenttia) ja tapauksessa 10 (2,8 prosenttia). Laattojen sarakkejaon takia kyseiset käsinlaskennan viivakuormatulokset eivät täysin vastaa todellista tilannetta, minkä takia tulokset poikkeavat hieman laskentaohjelmasta.

Tavanomaisessa rakennesuunnittelussa voidaan ajansäästöllisistä syistä määrittää lievästi epäsymmetristen laattojen kuormat jakamalla laatan tasokuormat karkeasti puolittain kantaville palkeille. Palkeille syntyneet viivakuormat pyöristetään usein ylöspäin varmuuden takaamiseksi. Palkkikuormituksen approksimaatiot voivat olla toimivia, jos kyseessä on lievästi epäsymmetrinen laatta. Voimakkaasti epäsymmetrisissä laatoissa karkeasti määritetyt viivakuormat eivät välttämättä enää ole luotettavia, jolloin rakenneosia voidaan tällöin vahingossa ali- tai ylimitoitaa.

### 6.2.3 Reaktivoimien tuloksien vertailu

Palkin päiden liitosten mitoittamista varten laskettiin palkkien päiden reaktivoimat. Myös reaktivoimissa käytettiin laskentaohjelman vertailumenetelminä käsin- ja FEM-laskentaa. Poikkeamat olivat pieniä. Käsinlaskentaan verrattuna reaktivoimien kokonaispoikkeama oli keskimäärin 0,5 prosenttia ja FEM-laskentaan verrattuna 0,7

prosenttia. Yksittäisille palkeille, vertailumenetelmien tuloksiin suhteutetut poikkeamat olivat yleisesti alle prosentin. Poikkeuksellisesti tapauksien 9 ja 10 reaktiovoimien tulokset poikkesivat suurimmillaan 2,8 prosenttia. Tämä johtuu siitä, että vinosti tasolla oleville palkeille on määrätty vertailulaskelmissa viivakuormien approksimaatiot. Kuva 30 on kuvakaappaus Rhino-ikkunasta, laskentaohjelman 1–3 tapauksien reaktiovoimien tuloksista. Arvot on laskettu verkotuksella 10x10.



Kuva 30. Testikerrospohjan 1–3 tapauksien reaktiovoimien tulokset Rhinossa. Kuvan voimat on ilmoitettu palkkien pääty pisteissä.

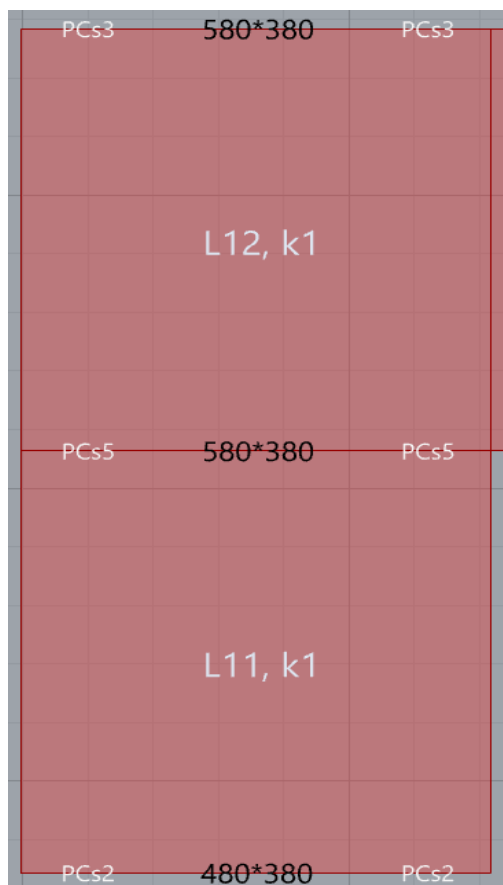
### 6.3 Piilokonsoli- ja palkkidimensioiteroinnin tulokset

Palkki-laattatapauksen 1 toiselle keskipalkkiin kytkeytyvälle laatalle kasvatettiin tasokuormaa aiemmasta vertailulaskelman lähtötietoarvosta. Aiemmassa tapauksessa määrätylle pienelle  $1 \text{ kN/m}^2$ :n tasokuormille ohjelma määräsi palkki-pilariliitoksiin oletetusti pienimmät vaadittavat PCs2-piilokonsolikoot. Tasokuormia nostettiin tällä kertaa selvästi, jotta laskentaohjelman tuloksiin saataisiin näkyviin erikokoisia piilokonsoleita sekä palkkidimensioita. Näin keskipalkin reaktiovoimiksi saatiin 356,8 kN. Päätypalkille saatiin vastaavat tulokset: 341,3 kN ja 37,2 kN. Reaktiovoimat on laskettu kuormituskertoimilla. Ohjelma laskee palkille momentit kahdella, aikaisemmin tässä diplomityössä esitetyillä, murtorajatilan kuormitusyhdistelmillä (kaavat (1) ja (2)).

Se valitsee piilokonsolimitoitukseen epäedullisemman kuormitusyhdistelmän, mikä tuottaa suuremman maksimimomentin tuloksen.

Laskentaohjelma määräsi keskipalkille PCs5-piilokonsolit. Laskettu voima (356,8 kN) on sallitussa rajoissa, sillä kuvan 17 taulukon mukaan, kyseistä piilokonsolia määrätään 355–520 kN suuruisille leikkausvoimille. Päätypalkeille ohjelma määräsi PCs3 ja PCs2-piilokonsolit. Laskentaohjelma on osannut nämäkin leikkausvoimat (341,3 kN ;37,2 kN) onnistuneesti asettaa sallittujen konsolikokojen rajoille (210–355 kN ;0–210 kN).

Laskentaohjelma laski keskipalkille palkkien dimensioiden valintaan vaikuttavan maksimiviivakuorman arvoksi 75,6 kN/m. Päätypalkeille vastaavat tulokset olivat 71,9 kN/m ja 3,6 kN/m. Arvot laskettiin ilman kuormituskertoimia sekä ilman palkkien omista painoista aiheutuvia kuormia. Palkkien pituudet ovat 7,2 m. Taulukon 1 380 mm levyisten palkkiprofiilikäyrien mukaan, suurimmat sallitut viivakuromien arvot kolmelle pienimmälle profiilikorkeudelle ovat 55 kN/m (480 mm), 85 kN/m (580 mm) ja 115 kN/m (680 mm). Laskentaohjelma valitsi keskelle 580x380 mm ja päätyihin 580x380 mm sekä 480x380 mm suuruiset palkit (leukapalkit). Kuvassa 31 näkyy, miten laskentaohjelma ilmoittaa käyttäjälle Rhino-ikkunassa palkkidimensio- sekä piilokonsoli-iteroinnin tulokset.



Kuva 31. Tapauksen 1 piilokonsoli- ja palkkikokoiteroinnin tulokset Rhinossa. Kuvan piilokonsolit on ilmoitettu lähellä palkkien pääty pisteitä ja palkkidimensiot laattakenttien keskipisteissä.

Vähiten kuormitetulle palkille (3,6 kN/m) ohjelma valitsi oikein pienimmän taulukoissa osoittautuneen profiilikoon. Toisen päätypalkin sekä keskipalkin tapauksissa viivakuorma-arvot (75,6 kN/m ja 71,9 kN/m) ylittävät käyrästöjen pienemmälle palkkiprofiilikorkeudelle sallitun rajan. Palkkiprofiilin koko täytyy tällöin lukea ylemmistä käyristä (kts. Taulukko 1), joissa mitoittavat viivakuorma-arvot sallitaan. Laskentaohjelma valitsi keskipalkille sekä toiselle päätypalkille profiilikoot oikein (580x380 mm), joiden sallituksi maksimiviivakuormien raja-arvoksi on palkkiprofiilitaulukon käyrästöissä määrätty 85 kN/m.

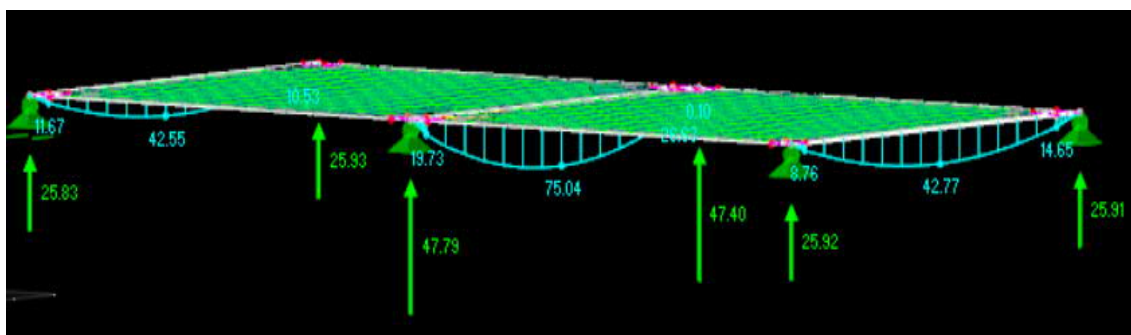
Laskentaohjelma iteroi profiilileveyksillä  $b=380$  mm ja  $b=480$  mm olevia teräsbetonipalkkitaulukoita. Kun mitoittavan viivakuorman arvo sattuu kummankin taulukon sallittujen profiilikokäyrien alueille, ohjelma valitsee automaattisesti sen palkkiprofiilikoon, jonka leikkauspinta-ala on sallitussa rajoissa pienempi.



## 6.4 FEMillä lasketun palkki-laattarakennemallin tuloksien vertailu

Diplomityössä vielä verrattiin, kuinka puhtaasti elementtimenetelmällä (FEMillä) lasketut palkki-laattamallin tulokset poikkeavat tutkielman laskentaohjelman sekä käsinlaskennan tuloksista. Tarkasteluun valittiin tuloksien vertailuun luodun kerrospohjan ensimmäinen tapaus, missä kaksi samanaista laattaa kytkeytyy keskipalkille. FEMiin mallinnetuille laatoille määrättiin vertailulaskentalähtötietojen mukaisesti  $1 \text{ kN/m}^2$ :n suuruiset tasokuormat. Laattojen omapainoja ei otettu vertailulaskelmien tavoin huomioon. FEM-ohjelmana käytettiin Dlubal RFEM 5tä.

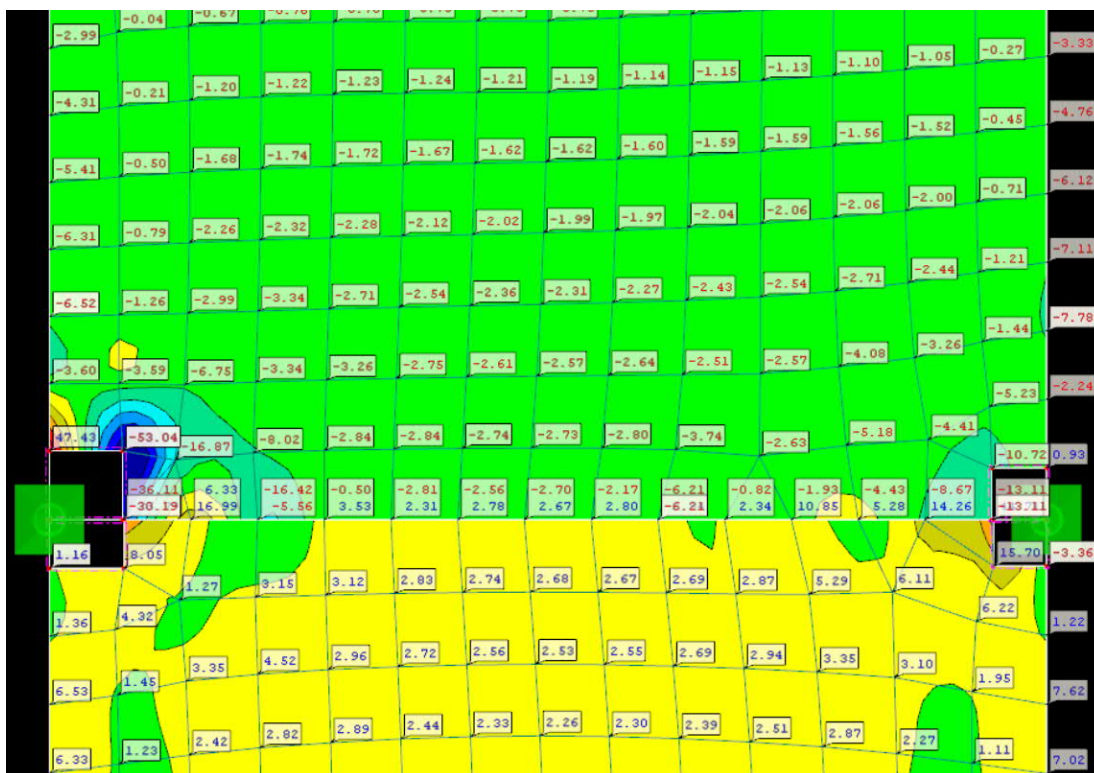
Kuva 32 on kuvakaappaus RFEMin momenttilaskennan- sekä reaktiovoimalaskennan tuloksista. Keskipalkille maksimitaivutusmomentiksi saatiin  $75,04 \text{ kNm}$ . Päätypalkeille  $42,77 \text{ kNm}$  ja  $42,55 \text{ kNm}$ . Tulokset poikkeavat keskipalkilla käsinlaskennan- ja laskentaohjelman tuloksista noin prosentin verran. Päätypalkeilla tulos poikkeaa noin 22 prosenttia. Poikkeamat olivat suuria myös tukireaktioiden tuloksissa. RFEMin keskipalkin tukireaktioiden arvot poikkesivat käsinlaskennan- ja laskentaohjelman tuloksista noin 13,5 prosenttia. Päätypalkeilla poikkeamat olivat noin 11 prosenttia. Tukivoimien yhteenlasketut tulokset RFEMissä, käsinlaskennassa sekä laskentaohjelmassa (pienistä pyöristystoimenpiteiden vaikutuksista huomioimatta) täsmäsivät. Kuormia ei siis laskennan tuloksista ”katoa” mihinkään.



Kuva 32. Tapauksen 1 reaktiovoima- ja momenttilaskennan tulokset RFEMissä. Tulokset ovat virheellisiä, koska tasokuormat jakaantuvat laattojen solmupistevoimista epätasaisesti palkeille.

FEMillä laattojen kuori- tai laattaelementeille määrätty tasokuormat eivät jakaudu solmupisteiden välityksillä oikeassa suhteessa palkeille, mikä voi olla syynä, mikseivät RFEM-tulokset ole vertailukelpoisia. Tästä syystä myös palkeille muodostuneet leikkausvoimakuvaajat ovat yleensä vääristyneitä. Kuva 33 havainnollistaa, miten tapauksesta 1 muodostetun RFEM-mallin laattojen solmupistevoimat kantautuvat keskipalkille.





Kuva 33. Tapauksen 1 kuormien jakautuminen laattojen kentistä palkeille (RFEM). Kuvan ruutujen arvot vastaavat laattakenttien solmupistevoimia. Kuva havainnollistaa kuinka kuormat pyrkivät siirtymään suoraan palkkien tuille.

Momenttilaskennan tarkkuutta pyrittiin parantamaan mallintamalla laatan nurkkiin pienet aukot (kuva 33), mitkä estäisivät laatoilta tulevien solmuvoimien kertymisen suoraan palkkien nivellisiin tukiin. Momenttitulokset eivät juurikaan tarkentuneet eikä aukotuksella ollut muussakaan tapauksessa merkittävää laskennallista vaikutusta. Kuvan 33 sinisellä merkitystä alueesta nähdään, kuinka solmuvoimat kertyvät suoraan kohti keskipalkin toista tukipistettä. Voimia ei kerry palkkikentän elementtien solmupisteisiin tasaisesti. Kun FEMissä tasot ovat kuori- tai laattaelementtejä, niillä on kyky siirtää kuormia tukipinnoille itsenäisesti, jolloin kuormat jakautuvat jäykkyyksien suhteessa. Kuoret kantavat kuormia suoraan tukipisteille eivätkä ne kytkeydy palkkeihin. Tällainen ongelma osoittautuneen myöskin Grasshopperin Karamba3D-lisäosan laattojen kuori- tai laattaelementeille määrättyjen tasokuormien laskennassakin, minkä takia tulokset olivat Vähäsen diplomityössä epätarkkoja (Vähänen 2019). Tästä syystä Karamba3D-lisäosaa ei haluttu tämän diplomityön parametrisessa suunnitteluohjelmassa käyttää.

## 6.5 Muut algoritmisten laskentamenetelmäkokeilujen tulokset

Diplomityössä päätettiin olla hyödyntämättä laattojen tasokuormien laskennassa FEMiä, joten laskentamenetelmiä alettiin kehittää käsinlaskennan periaatteiden pohjilta. Edellisissä kappaleissa esitetyn prosenttiosuuslaskentamenetelmän lisäksi, kokeiltiin laattojen tasokuormia laskea toisella käsinlaskennan menetelmällä. Siinä laattakentän pistevoimat siirretään suoraan kantavien palkkien tuille. Menetelmässä laatat jaetaan samalla tavalla kuvan 21 mukaisesti ruutuihin, ja niille määrätään osapinta-alojen suhteen keskeiset pistevoimat, aivan kuten luvussa viisi on aiemmin esitetty. Erona prosenttiosuusmenetelmään on, että menetelmään luotiin algoritmit, mitkä lukevat jokaisen pistevoiman sijainnin ja siirtävät ne suoraan lähimpiin laattaa kantavien palkkien tukipisteisiin. Jokaisessa tukipisteessä kertyneet pistekuormat summataan, jolloin saadaan laatan tasokuormasta palkille syntyvät reaktiovoimat.

Tulokset olivat luotettavia, kun mallipohja sisälsi pelkästään suorakulmaisia laattoja. Epäsymmetrisissä laatoissa havaittiin jo selkeitä laskentavirheitä. Syyksi todettiin, että algoritmit saattoivat summata voimia väärissä suhteissa palkkien tukipisteisiin. Epäsymmetrisen laattakenttien pistevoimat voivat rajatapauksessa vaihtelevasti sijaita lähempänä palkin alkutukipistettä, minne ohjelma summasi merkatut pistekuormat. Osaruutujen painopisteiden sijainnit voivat muuttua jo pienestäkin laattageometrian muutoksesta, jolloin niissä sijaitsevat pistekuormat voivat jakautua sattumanvaraisesti tai jopa täysin palkin alku- tai loppupisteeseen. Menetelmä ei ota huomioon, että samasta pistekuormasta kantautuisi vaikutuksia jokaiseen laattaa kantavan palkin tukeen. Voimia voi siis kantautua epätasaisesti palkin tukipisteisiin.

Tämän laskentamenetelmäkokeilun haittapuolena oli myös, että verkotusmäärä täytyi asettaa parilliseksi, jotta tulokset olisivat luotettavia. Verkotus täytyi myös pitää tiheänä. Pariton verkotus aiheutti sen, että laatan keskilinjaan syntyi pistekuormia, mitkä voivat jakautua täysin palkkien alku- tai päätepisteisiin. Tällaiset pistekuormat ovat monesti yhtä kaukana palkkien alku- ja päätepisteistä, jolloin ohjelma arpoo niiden sijoituspaikat. Sen seurauksena palkin toiseen tukipisteeseen tavallisesti muodostui virheellisesti suurempi reaktiovoima, vaikka voimien pitäisi todellisuudessa olla yhtä suuria kummasakin palkin päätypisteissä.

Laskentaohjelmaa haluttiin kehittää alusta lähtien siihen muotoon, että aikaisemmin luotujen algoritmien tuloksia voitaisiin sujuvasti hyödyntää muissakin ohjelman laskureissa. Kokeilulla laskentamenetelmällä saatiin pelkästään vain tukireaktiivoimien tuloksia. Kuorma- ja momenttikuvaajille olisi pitänyt kehittää toinen laattojen kuormien jakautumiseen perustuva menetelmä, jolla kuvaajia olisi voinut luotettavasti palkkikentille muodostaa. Pian tämän laskentamenetelmän käytöstä luovuttiin, koska tuloksien epätasaisuuden puitteissa se ei ollut myöskään laskennallisesti selkeä sekä suoraviivainen.

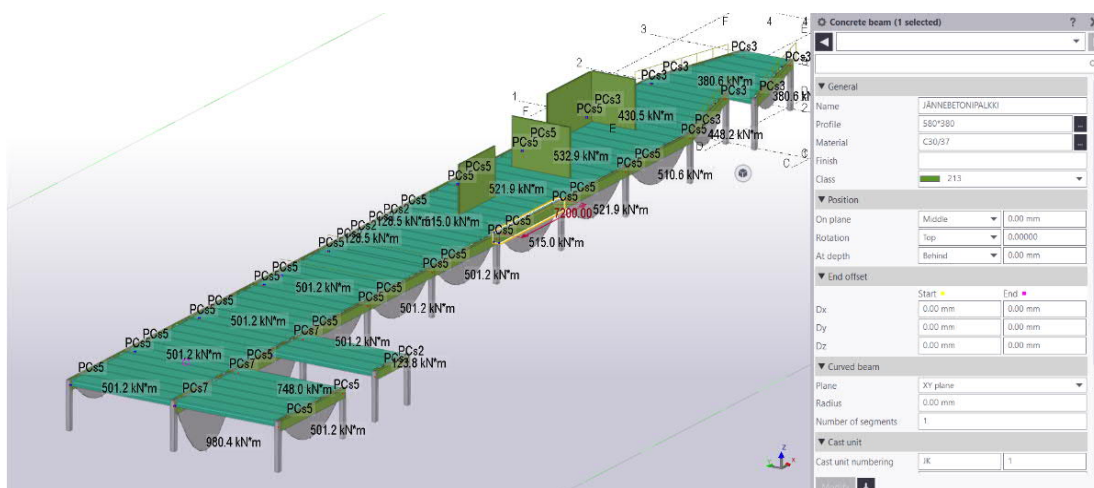
Tätä menetelmää jatkokehitettiin, jolloin päädyttiin nykyiseen diplomityön laskentaohjelmassa käytettyyn sekä luvussa viisi esiteltyyn käsinlaskentamenetelmän variaatioon. Laskentatulokset saatiin menetelmällä oikein. Tuloksellisesti luotettavan laskentamenetelmän löydettyä sekä ohjelman kehitykselle varatun ajan puutteessa, ei työssä nähty tarpeelliseksi kokeilla muita kuormien, kuorma- ja momenttikuvaajien laskentamenetelmiä.

## 6.6 Laskentatuloksien Tekla-mallinnus Tekla live linkin avulla

Tekla live link mahdollistaa laskentaohjelman tuloksien nopean reaaliaikaisen mallinnuksen. Rakenteet päivittyvät Teklaan samanaikaisesti, kun mallipohjiin tehdään käyttöjärjestelmässä tai Grashopperissa muutoksia. Laskentaohjelman laskentatuloksien automatisoitu mallinnus tuo uusia ulottuvuuksia rakenteiden toteutussuunnitteluun. Tavanomaisesti rakenteiden suunnittelu voidaan karkeasti kategoroida kolmeen osa-alueeseen: laskenta (mitoitus), mallinnus, raportointi. Jokainen vaiheistus toteutetaan tavanomaisesti itsenäisesti. Esimerkiksi rakenteiden mallinnuksessa, rakenteet mallinnetaan tavallisesti käsin alusta lähtien yksitellen arkkitehdin tasokuvien, IFC-mallien ja mitoituslaskelmien pohjilta. Parametrisessa suunnittelussa jokainen suunnittelukategoria voidaan alistaa yhdelle toimenpiteelle.

Kuvassa 34 on aikaisemmasta vertailulaskelmien kerrospohjasta laskentaohjelman tuloksista luotu Tekla-tietomalli. Kuormia on kerrostaosalla kasvatettu, jotta havaittaisiin piilokonsolien sekä rakenneosien koissa vaihtelevuutta. Kaikkien mallinnettavien rakenneosien lisäksi, Tekla-mallissa voidaan esittää muitakin laskennan tuloksia. Kuvassa 34 on rakenneosien lisäksi määrätty visualisoitavaksi momenttikuvaajat sekä niiden maksimiavot ja sijainnit. Tekla live linkillä voidaan määrittää, myös Teklan

rakenneosille komponenttikohtaisia attribuutteja, joita ovat muun muassa nimi, materiaali, luokka ja prefiksi. Tiedot välittyvät Tekla live linkin avulla automaattisesti jokaiselle määrätylle mallin rakenneosalle eikä niitä tarvitse erikseen käsin muuttaa. Kuvan 34 Tekla-mallin oikeassa laidassa on yhdelle palkille avattu ikkuna, minne laskentaohjelma on määrännyt kyseiselle rakenneosalle vaadittavat attribuutit.



Kuva 34. Laskentaohjelman parametrisesta mallista muodostettu Tekla-tietomalli. Kuvan oikeassa laidassa on komponenttikohtainen säätövalikko. Siitä nähdään muun muassa, minkä profiilin parametrinen laskentaohjelma on rakenneosalle määrännyt.

Laskentaohjelman tulokset mallintuivat Teklaan ongelmitta. Palkki- ja piilokonsolikokojen lisäksi, Paavo Vähäsen pilari-iterointialgoritmin tuloksetkin mallintuivat oikein. Tekla live linkin avulla voidaan helposti määrätä, mitkä kaikki ja missä muodossa tulokset halutaan mallissa esittää. Kuvan 34 tietomalliin on havainnollistamisen vuoksi esitetty momenttikuvaajat ohuina levykomponentteina. Kun palkkien momentti- ja kuormakuvaajat ilmoitetaan Tekla-komponenteilla visuaalisesti, voidaan niiden avulla helposti ja nopeasti muodostaa palkkikohtaisia kuormitus-momenttikuvaajapiirustuksia. Siitä voi olla merkittävää hyötyä esimerkiksi esijännitettyjen palkkien punosten, palkkireikien tai raudoituksien suunnitteluissa. Teklassa on myös mahdollista ilmoittaa tulokset teksteinä mallinnettujen rakenneosien lisätietokentässä. Niistä voidaan tietoja yhtä hyvin rakenneosien tarkentavissa mitoituskalkelmissa hyödyntää.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Parametrisia laskentaohjelmia voidaan hyödyntää rakennesuunnittelussa, tavanomaisiin menetelmiin verrattuna, luotettavasti. Parametriseen mallinnukseen perustuvan ohjelman teko vaatii kuitenkin aikaa, käytettävien ohjelmien hallintaa sekä fysikaalisten ilmiöiden tuntemista. Kun ohjelmakehitysprosessin tuloksena saadaan luotettava ja hyvin toimiva laskentaohjelma, voi rakenteiden suunnitteluun, voimien- sekä momenttien analysointiin kulua huomattavasti vähemmän aikaa.

Edellisen luvun sekä liitteen 1 mukaiset tulokset saatiin laskentaohjelmalla ulos noin viidessätoista minuutissa. Samassa ajassa ohjelma oli muodostanut kerroksesta laskentatuloksiin perustuvan Tekla-mallin. Kymmenen minuuttia kului AutoCADin dwg-mallipohjan luontiin. Noin (yhteensä) viisi minuuttia kului mallipohjan importaukseen, kuormien määrittämiseen sekä tuloksia tarkentavaan verkotuksen tihennykseen. Pelkästään tapauksen 1 käsinlaskennan kuormakuvaajan- sekä momenttikuvaajan määrittäykseen kului lähes yhtä paljon aikaa, noin kaksitoista minuuttia. Esimerkiksi tapauksen 8, jossa väliseinät olivat jakautuneet epäsymmetrisesti laatalle, käsinlaskennassa aikaa kului lähes 30 minuuttia. Siinä missä laskentaohjelma laskee automaattisesti arvot koko kerrokselle samalla muodostaen Tekla-tietomallin, voi pelkästään yksittäisen vaativan palkki-laattatapauksen käsinlaskennassa kestää huomattavasti kauemmin.

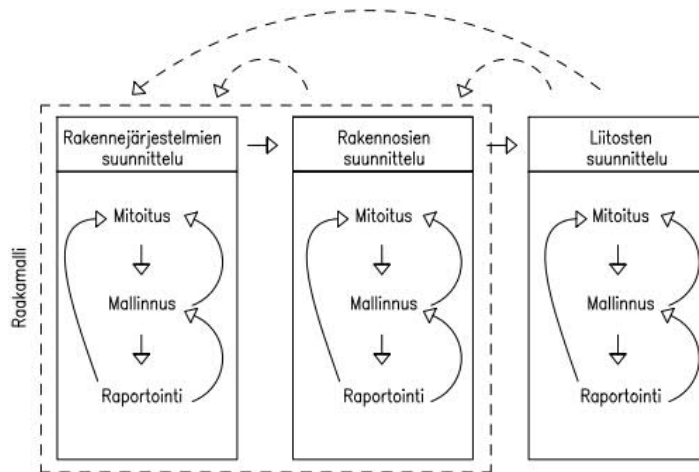
Laskentaohjelma määrittää automaattisesti iteroiden palkkikokodimensiot sekä piilokonsolien koot. Rakenneosia määrittäessä yksitellen käsin, voi yhdessä mallipohjan palkki-laattatapauksessa kulua aikaa keskimäärin noin viisi minuuttia. Palkki-laattatapauksen 1 ja 8 käsinlaskennan kokonaiskesto voisi diplomityön perusteella yhteensä olla noin 52 minuuttia (12+5 min. ja 30+5 min.). Siinä missä laskentaohjelma laskee tulokset koko kerrokselle, voi kahden tapauksen käsinlaskennassa kestää lähes kolme ja puoli kertaa kauemmin.

Laskentaohjelman näkymäasetuksista voidaan esittää palkkien päihin pelkästään laatoilta- tai palkeilta syntyvien reaktiovoimien tulokset. Käsinlaskentaan verraten, ohjelma osasi laskea ne tarkasti. Näkymäasetuksista voidaan aktivoida näkymä, mikä näyttää kerrokselta syntyvät pilarien normaalivoimat. Nämäkin tulokset olivat laskentaohjelmassa paikkansapitäviä.

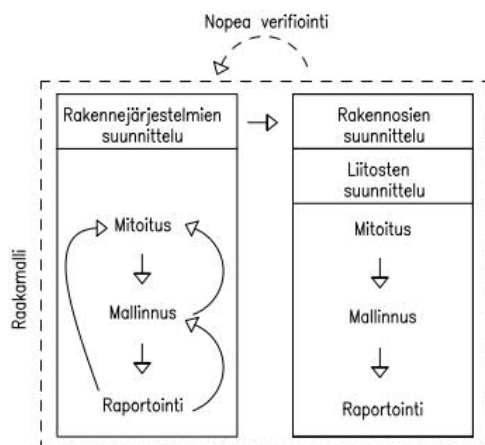
Laskentaohjelma toimi testauksessa hyvin. Diplomityön yhtenä tavoitteena oli löytää luotettava menetelmä, millä voi laskea automatiikan avulla kerrostason yhteen suuntaan kantavien laattojen kuormia. Tavoite oli selvittää, että voiko parametrissa suunnittelua hyödyntää rakennesuunnittelun toteutussuunnitelmissa. Tutkimustulokset osoittavat, kuinka onnistuneesti pystyttiin löytämään tasokuormien laskentaan sekä kuvaajien muodostamiseen soveltuvat laskentamenetelmät. Tutkimuksella pystyttiin osoittamaan, että parametrissa suunnittelua voidaan hyödyntää rakenteiden toteutussuunnittelussa ja rakenteiden analysoinnissa. Työssä pystyttiin myös osoittamaan, kuinka monipuolisesti algoritmeja pystytään erilaisten lähtötietojen perusteella rakennesuunnittelussa hyödyntämään.

Luvun 2 kuvan 1 kaavioissa on esitetty, kuinka rakenteiden suunnittelu voidaan tavanomaisella tavalla toteuttaa. Kuvaan 35 on kuvan 1 mukaisen taulukon alapuolelle lisätty toinen toimintaperiaatekaavio. Siinä kuvataan, millä tavalla suunnitteluvaiheistukset voisivat rakentua uudelleen, jos rakenteiden suunnittelussa hyödynnetään parametrissa suunnittelua.

Tavanomainen suunnittelu:



Parametrinen suunnittelu hyödyntäessä:



Kuva 35. Rakennesuunnittelu tavanomaisilla menetelmillä ja parametrisella suunnittelulla. Parametrinen suunnittelu voisi karsia kokonaan erillisen liittosuunnitteluvaiheen. Raakamalli voisi rakentua lähes kokonaan parametrisella suunnittelulla. Malli sisältäisi myös rakenneosien liitokset.

Tavanomaisesti suunnitellun raakamallin rakennetiedot voivat olla suurpiirteisiä. Parametrinen suunnittelu voi mahdollistaa nopean ja tarkan mallinnuksen suoraan arkkitehtisuunnitelmien päälle piirretyistä kerrospohjien dwg-pohjista. Se myös mahdollistaa raakamalliin nopean liitosten mallinnuksen reaaliaikaisesti päivittyvän verifiointin avulla. Liitokset mallintuisivat automaatiolla samanaikaisesti muiden rakenneosien kanssa. Parametrinen laskentaohjelma voi hoitaa automatiikalla kaikkien rakenteiden dimensioiden ja liitoksien iteroinnin. Rakennus voisi tällöin mallintua käytännössä kokonaisuudessaan jo luonnossuunnitteluvaiheessa. Ei siis ole mahdottomuus, että parametrisella suunnittelulla luonnossuunnitteluvaihe voidaan tulevaisuudessa sisällyttää osittain tai mahdollisesti lähes kokonaan toteutussuunnitteluun.

Parametrisesta laskennasta voidaan helposti exportata tuloksia raportointia varten. Tiedot voidaan muuttaa esimerkiksi Excel-taulukoiksi. Tavallisesti raakamallin raportointi koostuu kustannustiedoista, mitkä pohjautuvat rakennuksen rakenneosien dimensiotietoihin sekä määrälaskelmiin. Raakamallinnetun rakennuksen kokonaiskustannusarvio voi tarkentua parametrisella suunnittelulla, koska mallista on mahdollisuus pienellä vaivalla selvittää määrä- ja dimensiotietojen lisäksi rakenneosien liitostiedot.

Runkojärjestelmien määrittämien voisi toteuttaa täysin tai osittain parametrisella suunnittelulla. Rakennuksen stabiilisuus olisi algoritmeilla helposti tutkittavissa ja rakennemuutosvaikutuksia voidaan analysoida reaaliaikaisesti. Virheiden vaikuttaessa tai lähtötietojen muuttuessa, parametrissa mallia voidaan nopeasti verifioida esimerkiksi muuttamalla ohjelmaan importattuja 2D-mallipohjia. Uusintalaskennan tulokset päivittyvät sekä uudelleenmallintuvat automaattisesti.

Parametrinen suunnittelu voisi tulevaisuudessa karsia kokonaan erillisen liitosten suunnittelun välivaiheen (kts. Kuva 35). Parametrisella suunnittelulla voidaan mahdollisesti automaattisesti määrittää ja mallintaa kaikki rakennuksen kantavat rakenneosat, mikä merkitsisi merkittäviä ajansäästöjä projekteissa. Parametrisella suunnittelulla voi olla merkittävää etua tarjousvaiheen kilpailutuksessa. Projektin rakennesuunnittelutyön kilpailutus voi ratketa parametrin suunnittelun eduksi, sillä rakennuksesta on muodostettu jo varhain hyvä ja kattavasti kustannuseritelty malli, jolle on mahdollisesti arvioitu tavanomaiseen suunnitteluun verrattuna lyhytaikaisempi rakennesuunnitelmien valmistumistavoite. Parametrisella suunnittelulla voidaan suurta ajallista tarvetta vaativat laskenta- ja mallinnusosuudet hoitaa nopeasti, jolloin muille suunnittelutöille (esimerkiksi tarkentavat suunnitelmat, detaljointi, tarkentavat mitoitus, tarkentavat mallinnustyöt, tarkistus ja projektihallintatyöt) jää enemmän aikaa.

Tätä diplomityön parametrissa laskentaohjelmaa tullaan vielä tulevaisuudessa kehittämään. Ohjelmaan lisätään muun muassa kantavien seinien-, useampaan kuin yhteen suuntaan kantavien laattojen- sekä laattareikien algoritmiset laskurit. Tulevaisuuden tavoitteena on, että loppuun asti kehitetty parametrinen laskentaohjelma laskisi, riippumatta kerroksien rakenteellisista sekä rakenneosia kuormittavista tekijöistä, kaikki rakennuksen kantavat rakenteet (mukaan lukien myös perustukset) ja rakenneosat.



Diplomityön laskentaohjelman laattojen tasokuormien määrittäminen tullaan myös tulevaisuudessa mahdollisesti toteuttamaan toisella tavalla. Yksi mahdollisuus olisi määrittää tasokuormat, käyttöjärjestelmän sijasta, AutoCADissa dwg-mallipohjien kerrostasoihin. Kuormat voisi ilmoittaa teksteinä dwg-tiedostoissa, joista ne muutetaan kuormatiedoiksi laskentaohjelman algoritmien avulla.

Tekla live link -lisäosan ja Teklan työkaluja voisi jatkotutkimustyönä kehittää, jotta parametrusten laskentatuloksien linkitykset olisivat jatkossa helpommin ja suoraviivaisemmin toteutettavissa. Tekla live link -lisäosassa ei ole mahdollista valita muun muassa ontelolaatoille erillisiä mallinnusobjekteja, vaan ne täytyy muodostaa useista yksittäisistä objektiyhdistelmistä. Lisäksi ontelolaattakokoa vaihdettaessa täytyy ontelolaatoille tehdä Tekla-mallissa tiettyjä tarvittavia toimenpiteitä. Teklan toimintaperiaatteita olisi kannattavaa kehittää sellaisiksi, joissa se pystyisi esimerkiksi määrittämään rakenneosien liitokset pelkästään laskentaohjelman tuloksien arvojen perusteella. Parametrisen laskentaohjelman palkkien päiden leikkausvoimatulokset päivittyisivät Tekla-mallin rakenneosien lisätietokenttiin, minkä perusteella Tekla valitsisi ja mallintaisi automaattisesti vaadittavat liitoskomponenttien koot. Liitos voi olla piilokonsoli tai ulkoinen raudoitettu teräsbetonikonsoli. Konsolityyppi voisi olla Teklassa manuaalisesti vaihdettavissa. Laskentaohjelma ilmoittaa Teklassa tähän mennessä piilokonsolien koot tekstinä palkkien päiden pisteissä. Tekla live linkin avulla ei pysty tällä hetkellä syöttämään palkeille sellaista tietoa, että liitokset mallintuisivat todellisina komponentteina Tekla-malliin. Liitokset täytyy edelleen käsin määrätä malliin tuloksien tekstiosien perusteella. Tämän takia Tekla-Grasshopper -liitososien mallinnustyökaluissa voidaan nähdä selvästi erottuvia kehitysmahdollisuuksia.

## 8 YHTEENVETO

Diplomityölle luotiin hyvä parametrinen suunnitteluohjelma, minkä testitulokset olivat käsin- ja FEM-vertailulaskentaan suhteutettuna tarkkoja. Laskentaohjelman ja vertailulaskelmien tuloksien kokonaispoikkeama oli kokonaisuudessaan vain 0,5%. Se on hyvin pieni, koska jopa kahden prosentin kokonaispoikkeamakin on suhteellisen tarkka testitulos. Tutkimuksessa onnistuttiin löytämään laskentametodi, mikä laskee automatiikan avulla luotettavasti yhteen suuntaan kantavia laattoja riippumatta siitä, millaisia laattageometrioita kerrostasoilla ilmenee. Laskentaohjelman muodostamat momentti- ja kuormakuvaajat vastasivat todellisuutta. Myös piilokonsoli-, pilari- ja palkkikoot iteroitiin ohjelmassa oikein.

Yksinkertaisista laskentametoodeista huolimatta, diplomityössä tuotetulla Grasshopper-mallilla voidaan analysoida monimutkaisia rakenteita. Grasshopper-mallin laajuuteen vaikutti, ettei sen muodostamisessa ole käytetty laajennusosia, mitkä olisivat voineet tiivistää laskennan algoritmeja. Useasta Grasshopperin lisäosatarjonnasta huolimatta, niillä ei nähty laskentamenetelmien kehityksissä merkittäviä hyötyjä. Lähes kaikki laskentamenetelmiin liittyvät algoritmit ja metodit kehitettiin alusta lähtien itse Grasshopperin vakio-objekteilla.

Diplomityön laskentaohjelman rakentamisessa, suurimmat ongelmat koostuivat tietoteknillisistä ja Grasshopper-objektien toiminnallisista edellytyksistä. Objekteista täytyi luoda algoritmisia yhdistelmiä, joiden tiedot täytyi useassa tapauksessa ilmoittaa samassa muodossa sekä järjestyksessä muiden algoritmien kanssa. Pienikin yksittäisen objektin tietorakenteellinen poikkeama voi johtaa koko mallin virheelliseen toimintaan. Haasteeksi osoittautui siis luoda algoritmeja, joiden tietomuodot olivat keskenään yhteensopivia. Lisäksi koko laskentaohjelmakokonaisuus täytyi muodostaa tietorakenteellisesti loogiseen tasapainoon. Niissä onnistuttiin lopulta hyvin.

Tämä diplomityö todistaa, että parametrisesta suunnittelusta voisi olla merkittävää hyötyä toteutussuunnittelussa. Jo tämän diplomityön teon aikana, luotu laskentaohjelma herätti rakennesuunnittelijoiden keskuudessa yleistä kiinnostusta. Laskentaohjelmaa olisi jo haluttu kattavasti hyödyntää muutamiin käynnissä oleviin projekteihin, mutta kun ohjelma oli tällöin vielä kehitysvaiheessa, ei sitä pystytty niissä vielä täysin luotettavasti hyödyntämään.

Rakennesuunnitteluun liittyvässä tutkimus- ja kehitystoiminnassa pitäisi tulevaisuudessa paneutua entistä enemmän parametrinen suunnittelumenetelmien tarjoamiin mahdollisuuksiin. Mahdollinen tulevaisuuden visio voisi perustua yleiseen toimintaperiaatteeseen, missä koko rakennesuunnittelun pohjatyö ja mallinnus pohjautuisi parametriseen suunnitteluun. Muun muassa detaljien- ja rakennetyyppien piirtäminen sekä yleiset tietomallia koskevat tarkentavat käsittelyt toteutettaisiin edelleen tavanomaisilla menetelmillä. Tavoitteeseen pyrkiminen vaatisi kuitenkin yleistä lisätutkimusta, mahdollisesti ohjelmistojen lisäkehittymistä sekä suunnittelijoiden asenteiden ja tottumuksien muuttumista. Parametrinen rakennesuunnittelun yleinen hyödyntäminen mahdollisesti vaatisi tulevaisuuden suunnittelijoilta osaamista muodostaa algoritmisia laskentamalleja ja ymmärrystä niiden yleisistä toimintaperiaatteista.

## LÄHDELUETTELO

Elementtisuunnittelu.fi, 2010. Teollisuus- ja varastorakennukset, runkojärjestelmät [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/teollisuus-ja-varastorakennukset> [viitattu 19.10.2020].

Elementtisuunnittelu.fi. Ontelolaatat [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/laatat/ontelolaatat> [viitattu 17.11.2020].

Kallasjoki, T. 2016. Rakennushankkeen vaiheet [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/421362/mod\\_folder/content/0/4\\_Rakennushankkeen%20vaiheet.pdf?forcedownload=1](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/421362/mod_folder/content/0/4_Rakennushankkeen%20vaiheet.pdf?forcedownload=1) [viitattu 16.10.2020]. 44 s.

Parma, 2018. Parman ontelolaatatot, suunnitteluohje [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma\\_ontelolaatatot\\_suunnitteluohje\\_2018-1.pdf](https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma_ontelolaatatot_suunnitteluohje_2018-1.pdf) [viitattu 17.11.2020]. 82 s.

Peikko Group 2019. PCs-konsoli, Piilokonsolijärjestelmä palkkien kannattamiseen [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/GiEOLw/7gKL6GO0fQNN7Quypms8pQ/PCs\\_konsoli\\_fi-002.pdf](https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/GiEOLw/7gKL6GO0fQNN7Quypms8pQ/PCs_konsoli_fi-002.pdf) [viitattu 22.10.2020]. 48 s.

RIL 201-2011: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 190 s. ISBN 978-951-758-533-0

Sun, B. ja Huang, S. 2019. Realizing product serialization by Grasshopper parametric design [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/573/1/012078/pdf> [viitattu 19.10.2020]. 8 s.

Tanska, T. ja Österlund, T. 2014. Algoritmit puurakenteissa [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526204567.pdf> [viitattu 20.10.2020]. 176 s.

Vähänen, P. 2019. Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkorakenteiden luonnossuunnittelussa [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201906042312.pdf> [viitattu 9.10.2020]. 84 s.

Liite 1. Palkki-laattatapauksien tuloksien vertailutaulukot. (1)

		LASKENTAOHJELMA (verkko 10x10)	KÄSINKLASKU (K)	ELEMENTTIENTIEMÄLLÄ, JIGI (I)	POIKKEAMA (%)
Tapaus 1	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	52,4	52,3	52,3	0,2 (K) ; 0,2 (I)
	keskipaikki	75,8	75,6	75,8	0,3 (K) ; 0 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	8,1	8,1	-	0 (K) ; 0 (K)
Tapaus 2	Reaktiivovoimat (kN)				
	keskipaikki	11,7	11,7	-	0 (K) ; 0 (K)
	päätypaikkit	29,1	29,1	29,1	0(K) ; 0 (I)
	Max.momentti (kN*m)				
	keskipaikki	42,1	42	42,1	0,2 (K) ; 0 (I)
Tapaus 3	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	52,4 ja 24,8 (verkko 20x20)	52,3 ja 24,7	52,3 ja 24,8	0,2 ja 0,4 (K) ; 0,2 ja 0 (I)
	keskipaikki	90,2 (verkko 20x20)	87,3	89,8	1,6 (K) ; 0,4 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	8,1 ja 15,3 (verkko 20x20)	8,1 ja 15,3	-	0 (K) ; 0 (K)
Tapaus 4	Reaktiivovoimat (kN)				
	keskipaikki	18,9 (verkko 20x20)	18,9	-	0 (K) ; 0 (K)
	päätypaikkit	27,5 ja 29,1 (verkko 20x20)	27,5 ja 29,1	27,5 ja 29,1	0 ja 0 (K) ; 0 ja 0 (I)
	Max.momentti (kN*m)				
	keskipaikki	38,9 ja 58,4 (verkko 20x20)	38,8 ja 58,2	38,9 ja 58,3	0,3 ja 0,3 (K) ; 0 ja 0,2 (I)
Tapaus 5	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	52,4	52,3	52,3	0,1 (K) ; 0,2 (I)
	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	8,1	8,1	-	0 (K) ; 0 (K)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
Tapaus 6	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	29,1	29,1	29,1	0 (K) ; 0 (I)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	60,2 (verkko 20x20)	59,5	59,9	1,2 (K) ; 0,5 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
Tapaus 7	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	15,3	15,3	-	0 (K) ; 0 (K)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	41,9 ja 31,3	41,5 ja 31,1	41,6 ja 31,2	0,9 ja 0 (K) ; 0,7 ja 0,3 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
Tapaus 8	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	52,4 ja 13,1	52,3 ja 13,1	52,3 ja 13,1	0,2 ja 1,5 (K) ; 0,2 ja 0 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	8,1	8,1	-	0 (K) ; 0 (K)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
Tapaus 9	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	14,5 ja 29,1	14,5 ja 29,1	14,6 ja 29,2	0 ja 0 (K) ; 0,7 ja 0,3 (I)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	65,4	65,3	65,6	0,2 (K) ; 0,3 (I)
	Max.viivakuorma : VS-pistevoima (kN/m : kN)				
Tapaus 10	Reaktiivovoimat (kN)				
	päätypaikkit	8,1 : 2,9	8,1 : 2,9	-	0 : 0 (K) ; 0 : 0 (K)
	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	34,8	34,8	35	0 (K) ; 0,6 (I)
	Max.viivakuorma (kN/m)				

Tapaus 6	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	65,4	65,3	65,6	0,2 (K) : 0,3(U)
	Max.viivakuorma : VS-pistevoina (kN/m : kN)				
	päätypaikkit				
Tapaus 7	Reaktiivoinnat (kN)	8,1 : 2,9	8,1 : 2,9	-	0 : 0 (K)
	päätypaikkit	34,8	34,8	35	0 (K) : 0,6 (U)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	73	73	73,4	0 (K) : 0,3 (U)
Tapaus 8	Max.viivakuorma : VS-pistevoina (kN/m : kN)				
	päätypaikkit	8,1 : 11,5	8,1 : 11,5	-	0 : 0 (K)
	Reaktiivoinnat (kN)				
	päätypaikkit	34,8	34,8	35	0 (K) : 0,3 (U)
Tapaus 9	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	83 ja 61,6	83,7 ja 61,8	84 ja 62,3	0,8 ja 0,3 (K) : 1,1 ja 1,1 (U)
	Max.viivakuorma : VS-pistevoina (kN/m : kN)				
	päätypaikkit	8,1 (kN/m) : 5,7 ja 1,2, 10,7 ja 6,5 (kN)	8,1 (kN/m) : 5,7 ja 1,2, 10,7 ja 6,5 (kN)	-	0 : 0 ja 0 : 0 ja 0 (K)
Tapaus 10	Reaktiivoinnat (kN)				
	päätypaikkit	43,5 ja 48,4 : 32,9 ja 36,6	43,7 ja 47,9 : 33 ja 36,4	43,8 : 48 ja 33,1 : 36,5	0,5 : 1 ja 0,3 : 0,5 (K) : 0,7 : 0,8 ja 0,6 : 0,3 (U)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	49 ja 51,8	49,0 ja 52,4	49 ja 52,8	0 ja 1,1 (K) : 0,4 ja 2,2 (U)
Tapaus 11	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	49 ja 51,8	49,0 ja 52,4	49 ja 52,8	0 ja 1,1 (K) : 0,4 ja 2,2 (U)
	Reaktiivoinnat (kN)				
	päätypaikkit	7,7 ja 7,6	7,6 ja 7,6	-	1,2 ja 0 (K)
Tapaus 12	Reaktiivoinnat (kN)				
	päätypaikkit	26,9 ja 27,9 : 28,4 ja 27,2	26,7 ja 27,8 : 28,8 ja 26,7	26,7 : ja 27,8 : 28,8 ja 27,7	0,7 ja 0,4 : 1,3 ja 1,8 (K) : 0,7 ja 0,4 : 1,4 ja 1,8 (U)
	Max.momentti (kN*m)				
	päätypaikkit	48,5	49,4	49,4	1,8 (K) : 1,8 (U)
Tapaus 13	Max.viivakuorma (kN/m)				
	päätypaikkit	7,3	7,1	-	2,8 (K)
	Reaktiivoinnat (kN)				
	päätypaikkit	27,2 ja 24,7	27,8 ja 25,3	27,8 ja 25,2	2,1 ja 2,3 (K) : 2,1 ja 2 (U)
Tapaus 14	KÄSINLASKU				
	Keskimääräinen reaktiivoinna (kN) poikkeama (%)	0,5	Keskimääräinen reaktiivoinna (kN) poikkeama (%)	0,7	
	Keskimääräinen viivakuorma (kN/m) poikkeama (%)	0,2		-	
	Keskimääräinen momentti (kN*m) poikkeama (%)	0,6	Keskimääräinen momentti (kN*m) poikkeama (%)	0,6	
Tapaus 15	Kokonaistapkeama (%)	0,5	Kokonaistapkeama (%)	0,6	Yht. keskimääräinen kokonaistapkeama (%)
					0,5

## 1. LÄHTÖTIEDOT

### Palkit

*Palkin dimensio*

$$h := 480 \text{ mm} \quad b := 380 \text{ mm}$$

$$A := h \cdot b = 0.182 \text{ m}^2$$

$$p_{\text{betoni}} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad a := 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

*Palkin omapaino*

$$g_{\text{palkit}} := A \cdot p_{\text{betoni}} \cdot a = 4.472 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Väliseinät

*Vs-dimensio*

$$h_{\text{kerroskorkeus}} := 3 \text{ m} \quad b_{\text{tiili}} := 130 \text{ mm}$$

$$A_{\text{vs}} := h_{\text{kerroskorkeus}} \cdot b_{\text{tiili}} = 0.39 \text{ m}^2$$

$$p_{\text{tiili}} := 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

*Vs-omapaino*

$$g_{\text{vs}} := A_{\text{vs}} \cdot p_{\text{tiili}} \cdot a = 5.737 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Laatat

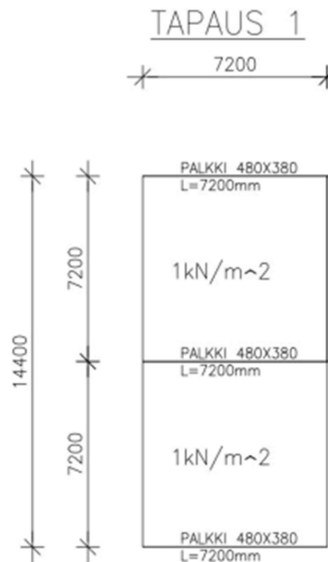
*Laattojen omapainot*

$$g_{\text{laatat}} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_{\text{laatat}_2} := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## 2. TAPAUS 1

### Tapausesitys



**Lähtötiedot***Laatan dimensio*

$$b_{laatta} := 7.2 \text{ m}$$

$$h_{laatta} := b_{laatta}$$

$$A_{laatta} := h_{laatta} \cdot b_{laatta} = 51.84 \text{ m}^2$$

$$x := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

*Viivakuorma laatalta palkeille*

$$g1_1 := x \cdot g_{laatat} = 3.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$L_{palkki} := 7.2 \text{ m}$$

**2.1 Päätypalkkien tulokset***Maksimiviivakuorma (kN/m)*

$$g1_{1\_kok} := g1_1 + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

*Maksimimomentti (kN\*m)*

$$M1_{1\_kok} := \frac{g1_{1\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 52.304 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Reaktiovoima (kN)*

$$N1_1 := \frac{(g1_{1\_kok} \cdot L_{palkki})}{2} = 29.058 \text{ kN}$$

**2.2 keskipalkin tulokset***Maksimiviivakuorma (kN/m)*

$$g2_{1\_kok} := g1_{1\_kok} + g1_1 = 11.672 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

*Maksimimomentti (kN\*m)*

$$M1_{1\_kok} := \frac{g2_{1\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 75.632 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Reaktiovoima (kN)*

$$N2_1 := \frac{(g2_{1\_kok} \cdot L_{palkki})}{2} = 42.018 \text{ kN}$$



### 3. TAPAUS 2

#### Tapausesitys



#### Lähtötiedot

*Laatan dimensio*

$$b1_{2\_laatta} := 7.2 \text{ m}$$

$$h1_{2\_laatta} := b1_{2\_laatta}$$

$$A1_{2\_laatta} := h1_{2\_laatta} \cdot b1_{2\_laatta} = 51.84 \text{ m}^2$$

$$x1_2 := \frac{h1_{2\_laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

*Viivakuorma laatalta palkeille*

$$g1_2 := x1_2 \cdot g_{laatat} = 3.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g2_2 := x1_2 \cdot g_{laatat\_2} = 10.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$L_{palkki\_2} := 3.6 \text{ m}$$

#### 3.1 Päätypalkkien tulokset

*Maksimiviivakuorma (kN/m)*

$$g1_{2\_kok} := g1_2 + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g2_{2\_kok} := g2_2 + g_{palkit} = 15.272 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

*Maksimimomentit (kN\*m)*

$$M1_{2\_kok} := \frac{g1_{2\_kok} \cdot (L_{palkki\_2})^2}{8} = 52.304 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2_{2\_kok}} := \frac{g_{2_{2\_kok}} \cdot (x_{1_2}^2)}{8} = 24.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Reaktiovoimat (kN)

$$N_{1_2} := \frac{(g_{1_{1\_kok}} \cdot b_{1_{2\_laatta}})}{2} = 29.058 \text{ kN}$$

$$N_{2_2} := \frac{(g_{2_{2\_kok}} \cdot x_{1_2})}{2} = 27.489 \text{ kN}$$

### 3.2 Keskipalkin tulokset

Maksimiviivakuorma (kN/m)

$$g_{3_{2\_kok}} := g_{1_{2\_kok}} + g_{2_2} = 18.872 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{1_2} := L_{palkki\_2} \cdot g_{3_{2\_kok}} = 67.938 \text{ kN}$$

$$F_{2_2} := L_{palkki\_2} \cdot g_{1_{2\_kok}} = 29.058 \text{ kN}$$

Reaktiovoimat (kN)

$$A_{y_2} := \frac{F_{2_2} \cdot \left(\frac{x_{1_2}}{2}\right) + F_{1_2} \cdot \left(L_{palkki} - \frac{x_{1_2}}{2}\right)}{L_{palkki}} = 58.218 \text{ kN}$$

$$B_{y_2} := -A_{y_2} + F_{1_2} + F_{2_2} = 38.778 \text{ kN}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_{2\_1} := A_{y_2} \cdot \left(\frac{L_{palkki}}{2}\right) - F_{1_2} \cdot \left(\frac{L_{palkki}}{2} - \frac{x_{1_2}}{2}\right) = 87.296 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2\_2} := B_{y_2} \cdot \left(\frac{L_{palkki}}{2}\right) - F_{2_2} \cdot \left(\frac{L_{palkki}}{2} - \frac{x_{1_2}}{2}\right) = 87.296 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 4. TAPAUS 3

### Tapausesitys



### Lähtötiedot

*Laatan dimensio*

$$b_{laatta} := 7.2 \text{ m}$$

$$h_{laatta} := b_{laatta}$$

$$A_{laatta} := h_{laatta} \cdot b_{laatta} = 51.84 \text{ m}^2$$

$$x := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

*Viivakuorma laatalta palkeille*

$$g_{13} := x \cdot g_{laatat} = 3.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$L_{palkki} := 7.2 \text{ m}$$

### 4.1 Päätypalkkien tulokset

*Maksimiviivakuorma (kN/m)*

$$g_{13\_kok} := g_{13} + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

*Maksimimomentti (kN\*m)*

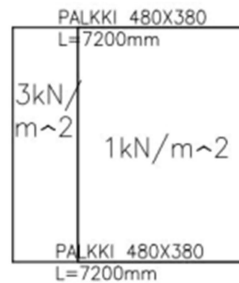
$$M_{13\_kok} := \frac{g_{13\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 52.304 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Reaktiovoima (kN)*

$$N_{13} := \frac{(g_{13\_kok} \cdot b_{laatta})}{2} = 29.058 \text{ kN}$$

## 5. TAPAUS 4

### Tapausesitys



### Laatta

*Laatan dimensio*

$$b2_{4\_laatta} := 2 \text{ m}$$

$$h2_{4\_laatta} := b2_{4\_laatta}$$

$$A2_{2\_laatta} := h2_{4\_laatta} \cdot b2_{4\_laatta} = 4 \text{ m}^2$$

$$b1_{4\_laatta} := L_{palkki} - b2_{4\_laatta} = 5.2 \text{ m}$$

$$h1_{4\_laatta} := b1_{4\_laatta}$$

$$A1_{4\_laatta} := h1_{4\_laatta} \cdot b1_{4\_laatta} = 27.04 \text{ m}^2$$

$$x1_4 := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

*Viivakuormat laatoilta palkeille*

$$g1_4 := x1_4 \cdot g_{laatat} = 3.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g2_4 := x1_4 \cdot g_{laatat\_2} = 10.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g2_{4\_kok} := g1_4 + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 5.1 Päätypalkkien tulokset

*Maksimiviivakuormat (kN/m)*

$$g1_{4\_kok} := g2_4 + g_{palkit} = 15.272 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F1_4 := g1_4 \cdot b1_{4\_laatta} = 18.72 \text{ kN}$$

$$F2_4 := g2_4 \cdot b2_{4\_laatta} = 21.6 \text{ kN}$$

Reaktivoimat (kN)

Lasketaan tukivoimat ja momentit keskellä palkkia:

$$A_y := \frac{F_{2_4} \cdot \left( \frac{b_{2_4\_laatta}}{2} \right) + F_{1_4} \cdot \left( \frac{b_{1_4\_laatta}}{2} + b_{2_4\_laatta} \right)}{L_{palkki}} = 14.96 \text{ kN}$$

$$B_y := -A_y + F_{2_4} + F_{1_4} = 25.36 \text{ kN}$$

$$N_{1_4} := A_y + \frac{(g_{palkki} \cdot L_{palkki})}{2} = 31.058 \text{ kN}$$

$$N_{2_4} := B_y + \frac{(g_{palkki} \cdot L_{palkki})}{2} = 41.458 \text{ kN}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

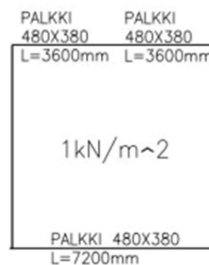
$$M_{4_1} := N_{1_4} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} \right) = 111.807 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{4_2} := g_{2_4\_kok} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{4} \right) \right) = 52.304 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{kok} := M_{4_1} - M_{4_2} = 59.504 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 6. TAPAU 5

Tapausesitys



Lähtötiedot

Laatan dimensio

$$L_{palkki\_5} := \frac{L_{palkki}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

$$b_{2_5\_laatta} := L_{palkki} = 7.2 \text{ m}$$

$$x_{1_5} := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

## 6.1 Päätypalkkien tulokset

Maksimiviivakuorma (kN/m)

$$g1_{3\_kok} := g1_3 + g_{palkit} = 8.072 \frac{kN}{m}$$

Maksimimomentit (kN\*m)

$$M1_{5\_kok} := \frac{g1_{3\_kok} \cdot (L_{palkki\_5})^2}{8} = 13.076 \text{ kN} \cdot m$$

Sama kuin tapaus 3:ssa, koska palkin pituus ei muutu:

$$M1_{3\_kok} := \frac{g1_{3\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 52.304 \text{ kN} \cdot m$$

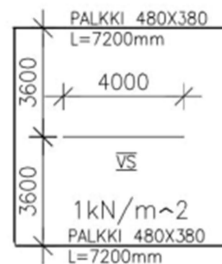
Reaktiovoimat (kN)

$$N1_5 := \frac{(g1_{3\_kok} \cdot b2_{5\_laatta})}{2} = 29.058 \text{ kN}$$

$$N2_5 := \frac{(g1_{3\_kok} \cdot x1_5)}{2} = 14.529 \text{ kN}$$

## 7. TAPAU 6

Tapausesitys



Lähtötiedot



Laatan dimensio

$$b2_{6\_laatta} := L_{palkki} = 7.2 \text{ m}$$

$$x1_6 := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

$$L_{vs} := 4 \text{ m}$$

## 7.1 Päätypalkkien tulokset

Tulokset, kN/m ja kN (väliseiniltä)

Lasketaan viivakuorma palkeille laattoilta.  
Laskentaohjelmassa väliseinävoimat on määrätty pistevoimiksi palkeille. Lasketaan käsin väliseinävoimien suuruudet pistevoimiksi palkeille niin kuin se on laskentaohjelmassa esitetty:

$$g1_{6\_kok} := g1_3 + g_{palkit} = 8.072 \frac{kN}{m}$$

Laskentaohjelmassa väliseinän pistevoimat oli jaettu neljään osaan. Väliseinä sijaitsee keskellä laattaa:

### Väliseinät

Vs-pistevoimien suuruudet palkeilla

$$F_6 := g_{vs} \cdot L_{vs} = 22.946 \text{ kN}$$

$$F_{vs\_6} := \frac{1}{2} \cdot \frac{F_6}{4} = 2.868 \text{ kN}$$

Vs-pistevoimien sijainnit palkeilla

$$x_6 := \frac{L_{vs}}{3} = 1.333 \text{ m}$$

$$x_{vs\_1} := \frac{L_{palkki}}{2} - \frac{L_{vs}}{2} = 1.6 \text{ m}$$

$$x_{vs\_2} := x_{vs\_1} + x_6 = 2.933 \text{ m}$$

$$x_{vs\_3} := x_{vs\_2} + x_6 = 4.267 \text{ m}$$

$$x_{vs\_4} := x_{vs\_3} + x_6 = 5.6 \text{ m}$$

Lasketaan reaktiovoimat ja momentti keskellä palkkia:

### Tulokset

$$F1_6 := g1_{6\_kok} \cdot b2_{6\_laatta} = 58.115 \text{ kN}$$

Reaktiovoimat (kN)

$$Ay_6 := \frac{F1_6 \cdot \left( \frac{b2_{6\_laatta}}{2} \right) + F_{vs\_6} \cdot (x_{vs\_1} + x_{vs\_2} + x_{vs\_3} + x_{vs\_4})}{L_{palkki}} = 34.794 \text{ kN}$$

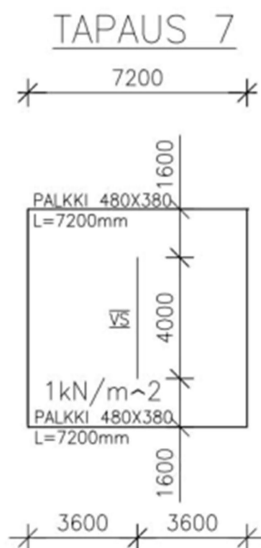
$$By_6 := -Ay_6 + 4 \cdot F_{vs\_6} + F1_6 = 34.794 \text{ kN}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_6 := Ay_6 \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} \right) - F_{vs\_6} \cdot (L_{palkki} - x_{vs\_1} - x_{vs\_2}) - \frac{g1_{6\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 65.306 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 8. TAPAUS 7

### Tapausesitys



$$b_{2\_laatta} := L_{palkki} = 7.2 \text{ m}$$

$$x_{1\_7} := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

$$L_{vs} := 4 \text{ m}$$

### 8.1 Päätypalkkien tulokset

Tulos, kN/m ja kN (väliseiniltä)

Lasketaan viivakuorma palkeille laattoilta. Lask.ohjelmassa väliseinä- voimat on määrätty pistevoimiksi palkeille. Lasketaan käsin väliseinien voimien suuruudet pistevoimiksi palkeille niin kuin se on laskentaohjelmassa esitetty:

$$g_{1\_7\_kok} := g_{1\_3} + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Laskentaohjelmassa väliseinien pistevoimat oli jaettu neljään osaan. Väliseinä sijaitsee keskellä laattaa. Lasketaan väliseinän pistevoimat palkille resultanttivoimasta:

$$F_7 := g_{vs} \cdot L_{vs} = 22.946 \text{ kN}$$

$$F_{vs\_7} := \frac{1}{2} \cdot F_7 = 11.473 \text{ kN}$$

Lasketaan reaktivoimat ja momentti keskellä palkkia:



Reaktiovoima (kN)

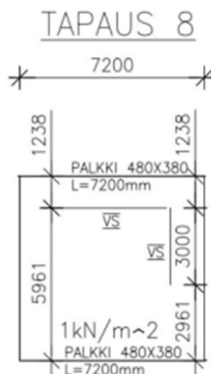
$$N_{17} := \frac{F_{vs\_7}}{2} + \frac{g_{17\_kok} \cdot L_{palkki}}{2} = 34.794 \text{ kN}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_7 := \frac{g_{16\_kok} \cdot (L_{palkki}^2)}{8} + F_{vs\_7} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{4} \right) = 72.955 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 9. TAPAUS 8

### Tapausesitys



### Lähtötiedot

$$889 \quad 5000 \quad 1311$$

$$b_{2s\_laatta} := L_{palkki} = 7.2 \text{ m}$$

$$x_{1s} := \frac{h_{laatta}}{2} = 3.6 \text{ m}$$

$$L_{1vs\_8} := 3 \text{ m}$$

$$L_{2vs\_8} := 4.8 \text{ m}$$

### 9.1 Päätypalkkien tulokset

Tulos, kN/m ja kN (väliseiniltä)

Lasketaan viivakuorma palkeille laattoilta. Lask.ohjelmassa väliseinä- voimat on määrätty pistevoimiksi palkeille. Lasketaan käsin väliseinien voimien suuruudet pistevoimiksi palkeille niin kuin se on laskentaohjelmassa esitetty:

$$g_{1s\_kok} := g_{13} + g_{palkit} = 8.072 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Väliseinät***Kantosuunnan mukainen*

$$F1_{res\_vs\_8} := g_{vs} \cdot L1_{vs\_8} = 17.21 \text{ kN}$$

*Poikittais-suuntainen*

$$F2_{res\_vs\_8} := \frac{g_{vs} \cdot L2_{vs\_8}}{4} = 6.884 \text{ kN}$$

*%-suhteen palkeille lasketut  
pistevoimat; poikittainen  
väliseinä*

$$x_{palkille1} := 1.238 \text{ m}$$

$$x_{palkille2} := 5.961 \text{ m}$$

$$a_{palkille1} := \frac{L_{palkki}}{x_{palkille1}} = 5.816$$

$$a_{palkille2} := \frac{L_{palkki}}{x_{palkille2}} = 1.208$$

$$X_{sum} := a_{palkille1} + a_{palkille2} = 7.024$$

*Prosenttiosuudet*

$$x_{palkille1\_pros} := \frac{a_{palkille1}}{X_{sum}} = 0.828$$

$$x_{palkille2\_pros} := \frac{a_{palkille2}}{X_{sum}} = 0.172$$

*Prosenttiosuudelliset pistekuormat*

$$F1_{vs8} := F2_{res\_vs\_8} \cdot x_{palkille1\_pros} = 5.7 \text{ kN}$$

$$F2_{vs8} := F2_{res\_vs\_8} \cdot x_{palkille2\_pros} = 1.184 \text{ kN}$$

*%-suhteen palkeille lasketut  
pistevoimat; laatan kantosuunnan  
suuntainen väliseinä*

$$x2_{palkille1} := 2.738 \text{ m}$$

$$a2_{palkille1} := \frac{L_{palkki}}{x2_{palkille1}} = 2.63$$

$$x2_{palkille2} := 4.461 \text{ m}$$

$$a2_{palkille2} := \frac{L_{palkki}}{x2_{palkille2}} = 1.614$$

$$X2_{sum} := a2_{palkille1} + a2_{palkille2} = 4.244$$

*Prosenttiosuudet*

$$x2_{palkille1\_pros} := \frac{a2_{palkille1}}{X2_{sum}} = 0.62$$

$$x2_{palkille2\_pros} := \frac{a2_{palkille2}}{X2_{sum}} = 0.38$$

*Prosenttiosuudelliset pistekuormat*

$$F3_{us8} := F1_{res\_us\_8} \cdot x2_{palkille1\_pros} = 10.664 \text{ kN}$$

$$F4_{us8} := F1_{res\_us\_8} \cdot x2_{palkille2\_pros} = 6.545 \text{ kN}$$

*Vs- pistekuormien sijainnit palkilla*

$$X_{us\_8} := \frac{L2_{us\_8}}{3} = 1.6 \text{ m}$$

*Vaakasuuntainen väliseinä*

$$x8_{us\_1} := 0.889 \text{ m} = 0.889 \text{ m}$$

$$x8_{us\_2} := x8_{us\_1} + X_{us\_8} = 2.489 \text{ m}$$

$$x8_{us\_3} := x8_{us\_2} + X_{us\_8} = 4.089 \text{ m}$$

$$x8_{us\_4} := x8_{us\_3} + X_{us\_8} = 5.689 \text{ m}$$

*Kantosuunnan suuntainen väliseinä*

$$x8_{us\_5} := x8_{us\_4} = 5.689 \text{ m}$$

*Lasketaan reaktiovoimat ja momentti keskellä palkkia:*

$$F1_8 := g1_{8\_kok} \cdot b2_{8\_laatta} = 58.115 \text{ kN}$$

## Tulokset

*Reaktiovoimat (kN)*

$$Ay1_8 := \frac{F1_8 \cdot \left( \frac{b2_{8\_laatta}}{2} \right) + F1_{us8} \cdot (x8_{us\_1} + x8_{us\_2} + x8_{us\_3} + x8_{us\_4}) + F3_{us8} \cdot x8_{us\_5}}{L_{palkki}} = 47.899 \text{ kN}$$

$$By1_8 := -Ay1_8 + 4 \cdot F1_{us8} + F3_{us8} + F1_8 = 43.68 \text{ kN}$$

$$Ay2_8 := \frac{F1_8 \cdot \left( \frac{b2_{8\_laatta}}{2} \right) + F2_{us8} \cdot (x8_{us\_1} + x8_{us\_2} + x8_{us\_3} + x8_{us\_4}) + F4_{us8} \cdot x8_{us\_5}}{L_{palkki}} = 36.392 \text{ kN}$$

$$By2_8 := -Ay2_8 + 4 \cdot F2_{us8} + F4_{us8} + F1_8 = 33.003 \text{ kN}$$

**Momentti**

$$Z_1 := Ay_1 \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} \right) - \frac{g1_{s\_kok} \cdot (L_{palkki})^2}{8} = 120.133 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_2 := F1_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x8_{vs\_1} + \frac{L_{palkki}}{2} - x8_{vs\_2} \right) = 21.785 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_3 := F3_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x8_{vs\_1} \right) = 28.911 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Momentti keskellä palkkia*

$$M1_8 := Z_1 - Z_2 - Z_3 = 69.436 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Momentti kohdassa x=4,1m*

$$x8_{vs\_6} := x8_{vs\_3} - \frac{L_{palkki}}{2} = 0.489 \text{ m}$$

$$F1_{vs8} = 5.7 \text{ kN}$$

$$g1_{s\_kok} \cdot L_{palkki} = 58.115 \text{ kN}$$

$$Z_4 := By_1 \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right) - \left( g1_{s\_kok} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right) \right) \cdot \frac{\left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right)}{2} = 111.131 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_5 := F1_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} - x8_{vs\_1} \right) + F1_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} - x8_{vs\_2} \right) = 27.36 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Momentti kohdassa x=4,1m*

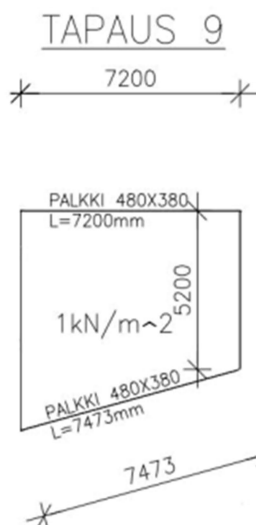
$$M2_8 := Z_4 - Z_5 = 83.771 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_6 := By_2 \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right) - \left( g1_{s\_kok} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right) \right) \cdot \frac{\left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} \right)}{2} = 67.473 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_7 := F2_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} - x8_{vs\_1} \right) + F2_{vs8} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} + x8_{vs\_6} - x8_{vs\_2} \right) = 5.682 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Maksimimomentti (kN\*m)*

$$M3_8 := Z_6 - Z_7 = 61.79 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**10. TAPAUS 9****Tapausesitys****Lähtötiedot**

$$L1_{\text{palkki}} := L_{\text{palkki}} = 7.2 \text{ m}$$

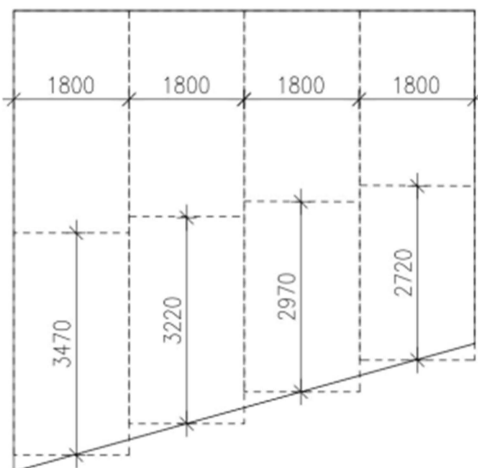
$$L2_{\text{palkki}} := 7.47 \text{ m}$$

*Laatan jaon sektorileveydet*

$$x_{\text{sektori}} := 1.8 \text{ m}$$

$$x_{\text{sektori\_palkki2}} := \frac{L2_{\text{palkki}}}{4} = 1.868 \text{ m}$$

*Lasketaan laattoilta ja palkeilta viivakuorma.  
Laatan geometria ei ole symmetrinen, joten  
laatta jaetaan sektoreihin:*



$$x_{\text{sektori}_1} := 3.47 \text{ m}$$

$$x_{\text{sektori}_2} := 3.22 \text{ m}$$

$$x_{\text{sektori}_3} := 2.97 \text{ m}$$

$$x_{\text{sektori}_4} := 2.72 \text{ m}$$

## 10.1 Päätypalkkien tulokset

Maksimiiviivakuorma (kN/m)

$$g_{19\_kok} := x_{\text{sektori}_1} \cdot g_{\text{laatat}} + g_{\text{palkit}} = 7.942 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{29\_kok} := x_{\text{sektori}_2} \cdot g_{\text{laatat}} + g_{\text{palkit}} = 7.692 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{39\_kok} := x_{\text{sektori}_3} \cdot g_{\text{laatat}} + g_{\text{palkit}} = 7.442 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{49\_kok} := x_{\text{sektori}_4} \cdot g_{\text{laatat}} + g_{\text{palkit}} = 7.192 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Keskiarvo sektoriviivakuormista

$$g_{9\_kok1} := \frac{g_{19\_kok} + g_{29\_kok} + g_{39\_kok} + g_{49\_kok}}{4} = 7.629 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Reaktivoimat ja momentti keskellä palkkia:

$$x_{9\_sektori_1} := \frac{x_{\text{sektori}}}{2} = 0.9 \text{ m}$$

$$x_{9\_sektori_2} := x_{9\_sektori_1} + x_{\text{sektori}} = 2.7 \text{ m}$$

$$x_{9\_sektori_3} := x_{9\_sektori_2} + x_{\text{sektori}} = 4.5 \text{ m}$$

$$x_{9\_sektori_4} := x_{9\_sektori_3} + x_{\text{sektori}} = 6.3 \text{ m}$$

Keskeiset pistekuormat sektorien viivakuormista (Palkki 1)

$$F_{19} := g_{19\_kok} \cdot x_{\text{sektori}} = 14.295 \text{ kN}$$

$$F_{29} := g_{29\_kok} \cdot x_{\text{sektori}} = 13.845 \text{ kN}$$

$$F3_9 := g3_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori}} = 13.395 \text{ kN}$$

$$F4_9 := g4_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori}} = 12.945 \text{ kN}$$

*Sama laskutoimitus myös toiselle palkille:*

$$x9_{\text{sektori}_5} := \frac{x_{\text{sektori\_palkki2}}}{2} = 0.934 \text{ m}$$

$$x9_{\text{sektori}_6} := x9_{\text{sektori}_5} + x_{\text{sektori\_palkki2}} = 2.801 \text{ m}$$

$$x9_{\text{sektori}_7} := x9_{\text{sektori}_6} + x_{\text{sektori\_palkki2}} = 4.669 \text{ m}$$

$$x9_{\text{sektori}_8} := x9_{\text{sektori}_7} + x_{\text{sektori\_palkki2}} = 6.536 \text{ m}$$

*Keskeiset pistekuormat sektorien viivakuormista (palkki 2)*

$$F5_9 := g1_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori\_palkki2}} = 14.831 \text{ kN}$$

$$F6_9 := g2_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori\_palkki2}} = 14.364 \text{ kN}$$

$$F7_9 := g3_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori\_palkki2}} = 13.897 \text{ kN}$$

$$F8_9 := g4_9_{\text{kok}} \cdot x_{\text{sektori\_palkki2}} = 13.43 \text{ kN}$$

*Reaktiivoimat (kN)*

$$Ay1_9 := \frac{F1_9 \cdot x9_{\text{sektori}_1} + F2_9 \cdot x9_{\text{sektori}_2} + F3_9 \cdot x9_{\text{sektori}_3} + F4_9 \cdot x9_{\text{sektori}_4}}{L_{\text{palkki}}} = 26.677 \text{ kN}$$

$$By1_8 := -Ay1_9 + F1_9 + F2_9 + F3_9 + F4_9 = 27.802 \text{ kN}$$

$$By2_9 := \frac{F5_9 \cdot x9_{\text{sektori}_5} + F6_9 \cdot x9_{\text{sektori}_6} + F7_9 \cdot x9_{\text{sektori}_7} + F8_9 \cdot x9_{\text{sektori}_8}}{L2_9_{\text{palkki}}} = 27.677 \text{ kN}$$

$$Ay2_8 := -By2_9 + F5_9 + F6_9 + F7_9 + F8_9 = 28.845 \text{ kN}$$

Lasketaan momentti palkin keskellä:

$$Z_{19} := By_{18} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} \right) = 100.087 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{29} := F_{19} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x_{9_{sektori\_1}} \right) + F_{29} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x_{9_{sektori\_2}} \right) = 51.056 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_9 := Z_{19} - Z_{29} = 49.031 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{39} := By_{29} \cdot \left( \frac{L_{29\_palkki}}{2} \right) = 103.375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{49} := F_{59} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x_{9_{sektori\_5}} \right) + F_{69} \cdot \left( \frac{L_{palkki}}{2} - x_{9_{sektori\_6}} \right) = 51.016 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

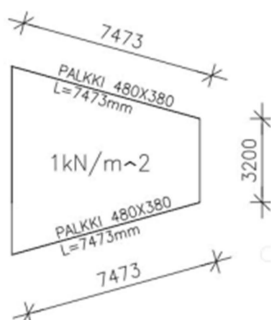
Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_9 := Z_{39} - Z_{49} = 52.359 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 11. TAPAUS 10

### TAPAUS 10

Tapausesitys



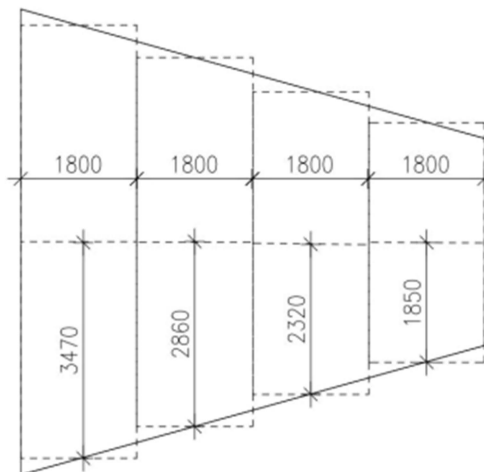
Laatan jaon sektorileveydet

$$L_{10\_palkki} := 7.47 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori} := 1.87 \text{ m}$$



Lasketaan laattoilta ja palkeilta viivakuorma.  
Laatta jaetaan sektoreihin.



$$x_{10\_sektori\_1} := 3.47 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_2} := 2.86 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_3} := 2.32 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_4} := 1.85 \text{ m}$$

### 11.1 Päätypalkkien tulokset

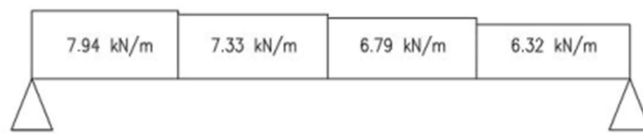
Maksimiviivakuorma (kN/m)

$$g_{10\_kok}^1 := x_{10\_sektori\_1} \cdot g_{laatat} + g_{palkit} = 7.942 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{10\_kok}^2 := x_{10\_sektori\_2} \cdot g_{laatat} + g_{palkit} = 7.332 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{10\_kok}^3 := x_{10\_sektori\_3} \cdot g_{laatat} + g_{palkit} = 6.792 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{10\_kok}^4 := x_{10\_sektori\_4} \cdot g_{laatat} + g_{palkit} = 6.322 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Keskiarvo sektoriviiva-  
kuormista

$$g_{10\_kok1} := \frac{g_{10\_kok}^1 + g_{10\_kok}^2 + g_{10\_kok}^3 + g_{10\_kok}^4}{4} = 7.097 \frac{kN}{m}$$

Lasketaan reaktivoimat ja momentti keskellä  
palkkia:

$$x_{10\_sektori\_1} := \frac{x_{10\_sektori}}{2} = 0.935 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_2} := x_{10\_sektori\_1} + x_{10\_sektori} = 2.805 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_3} := x_{10\_sektori\_2} + x_{10\_sektori} = 4.675 \text{ m}$$

$$x_{10\_sektori\_4} := x_{10\_sektori\_3} + x_{10\_sektori} = 6.545 \text{ m}$$

Keskeiset pistekuormat sektorien  
viivakuormista

$$F_{10} := g_{10\_kok} \cdot x_{10\_sektori} = 14.851 \text{ kN}$$

$$F_{20} := g_{10\_kok} \cdot x_{10\_sektori} = 13.71 \text{ kN}$$

$$F_{30} := g_{10\_kok} \cdot x_{10\_sektori} = 12.7 \text{ kN}$$

$$F_{40} := g_{10\_kok} \cdot x_{10\_sektori} = 11.821 \text{ kN}$$

Reaktivoimat (kN)

$$Ay_{10} := \frac{F_{10} \cdot x_{10\_sektori\_1} + F_{20} \cdot x_{10\_sektori\_2} + F_{30} \cdot x_{10\_sektori\_3} + F_{40} \cdot x_{10\_sektori\_4}}{L_{10\_palkki}} = 25.313 \text{ kN}$$

$$By_{10} := -Ay_{10} + F_{10} + F_{20} + F_{30} + F_{40} = 27.769 \text{ kN}$$

Momentti palkin keskellä:

$$Z_{10} := By_{10} \cdot \left( \frac{L_{10\_palkki}}{2} \right) = 103.719 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{20} := F_{10} \cdot \left( \frac{L_{10\_palkki}}{2} - x_{10\_sektori\_1} \right) + F_{20} \cdot \left( \frac{L_{10\_palkki}}{2} - x_{10\_sektori\_2} \right) = 54.332 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti (kN\*m)

$$M_{10} := Z_{10} - Z_{20} = 49.387 \text{ kN} \cdot \text{m}$$